

# ALEGRO

## **AUFBAU EINES LOKALEN MARITIMEN ERGÄNZUNGSSYSTEMS ZUR UNTERSTÜTZUNG HOCHPRÄZISER GALILEO-ANWENDUNGEN UND – DIENSTE IM FORSCHUNGSHAFEN ROSTOCK**


**Projekt im Rahmen des Europäischen Fonds für Regionale  
Entwicklung (EFRE) in Verbindung mit Mitteln des Landes  
Mecklenburg-Vorpommern**



**Förderkennzeichen : V230-360-08-TIFA-560**

**Projektlaufzeit : 01.11.2006 – 30.10.2008**

Projektleiter:	Dr. Evelin Engler
Technischer Leiter:	Dipl.-Ing. Thoralf Noack
Dokumentenname:	ALEGRO-ABSCHLUSSBERICHT-2008(FINAL).DOC
Version:	1.0
Erstellungsdatum:	04.12.2008 12:15
Seitenanzahl:	143

  
DLR

Institut für Kommunikation  
und Navigation

**Autoren des Berichts:**

***Dipl.-Informatiker Carsten Becker***

***Dipl.-Ing. Jamila Beckheinrich***

***Dr. Evelin Engler***

***Dipl.-Ing. Angelika Hirrle***

***Dr. Dietmar Klähn***

***Dipl.-Ing. Thoralf Noack***

***Dr. Roland Reimer***

***Dipl.-Ing. Markus Rippl***

***Dr. Stefan Schlüter***

**Änderungsbericht:**

Version	Datum	Seiten	Status	Geprüft
1.0	04.12.08	151	Endversion	Engler

**Inhaltsverzeichnis:**

<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ZIELE DER PROJEKTARBEITEN .....</b>	<b>12</b>
<b>2 VORAUSSETZUNG UND EINGESETZTE EINRICHTUNGEN .....</b>	<b>16</b>
<b>3 INTERNATIONALER STAND ZUM PROJEKTBEGINN.....</b>	<b>19</b>
<b>4 BESCHREIBUNG DURCHGEFÜHRTER ARBEITEN.....</b>	<b>23</b>
4.1 EINORDNUNG DER ARBEITEN IN DIE GESAMTAUFGABENSTELLUNG .....	23
4.2 EXPERIMENTELLE VORUNTERSUCHUNGEN .....	25
4.2.1 Validierungsmethodik.....	25
4.2.2 Leistungsfähigkeit phasenbasiertes, differentielles GPS.....	28
4.3 AUFBAU DES EXPERIMENTELLEN GBAS .....	39
4.3.1 Architekturdesign .....	39
4.3.2 Komponentenauswahl und –integration.....	42
4.3.3 EVnet-basierter Systemaufbau .....	52
4.3.4 Standortauswahl und –validierung.....	54
4.4 AUFBAU DES EXPERIMENTELLEN GBAS- BODENSYSTEMS .....	58
4.4.1 Architekturkonzept.....	58
4.4.2 HW Aufbau .....	61
4.4.3 Betriebssteuerung und –überwachung .....	62
4.4.4 SW-Entwicklung GNSS-Datenvorverarbeitung.....	66
4.4.5 SW-Entwicklung satellitenbasierter GNSS-Qualitätskenngrößen.....	78
4.4.6 SW-Entwicklung stationsbasierter GNSS-Qualitätskenngrößen.....	89
4.4.7 SW-Entwicklung GUI.....	98
4.4.8 SW-Entwicklung RTCM 3.0-Generator.....	110
4.5 AUFBAU DES EXPERIMENTELLEN GBAS- NUTZERSEGMENTS .....	111
4.5.1 Architekturkonzept.....	111
4.5.2 HW-Aufbau GBAS-Nutzersegment .....	115
4.5.3 SW-Aufbau GBAS-Nutzersegment .....	117
4.5.4 SW-Entwicklung GUI .....	126
<b>5 BEWERTUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE .....</b>	<b>130</b>
5.1 FACHLICHE BEWERTUNG .....	130
5.2 STRATEGISCHE BEWERTUNG .....	131
<b>6 AUSWERTUNG, NUTZUNG UND VERBREITUNG DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>133</b>
6.1 PUBLIKATIONEN .....	133
6.2 DATENBEREITSTELLUNG .....	133
6.3 ERGEBNISDOKUMENTATION.....	134
6.4 VERMARKTUNGSAUSSICHTEN DER ERGEBNISSE .....	136
6.5 GEWINN FÜR DAS DLR.....	138
<b>7 AUSWIRKUNGEN AUF DIE BESCHÄFTIGTEN.....</b>	<b>140</b>
<b>8 AUSBLICK.....</b>	<b>141</b>
<b>9 VERÖFFENTLICHUNGEN UND SCHUTZRECHTE .....</b>	<b>143</b>
<b>10 REFERENZEN .....</b>	<b>143</b>
<b>ANLAGE A: IALA BEACON DGNSS UND SEIN INTEGRITÄTSKONZEPT .....</b>	<b>143</b>

## Abbildungsverzeichnis:

Abb. 2-1	Zustandsklassifikation bei der Integritätsüberwachung	16
Abb. 3-1	DGPS-Netzwerk der USA (Maritimes Netzwerk – rote Stationen, [Coast Guard-2008])	19
Abb. 3-2	95%-Genauigkeit von DGNSS-basierter Ortung in Europa mit dem IALA Beacon System (Quelle: [Christansen-2005]) sowie Verfügbarkeit und Kontinuität für eine 10 m Genauigkeit und einen 25 m Alarmschwellwert	20
Abb. 4-1	Referenztrajektorien unabhängig ermittelt für die 4 mobilen Empfänger an Bord der „Prof. A. Penck“ mit Hilfe der Daten der Referenzstationen (IGS Warnemünde, ALEGRO Referenzstation) am 2.2.2007 um 7:45:33 Uhr	26
Abb. 4-2	Darstellung der mit TTC berechneten Höhenwerte vom Schiff für den 31.1.2007	27
Abb. 4-3	RMS-Werte (in Meter) für GDLR-Trajektorienbestimmung mit der ALGERO Referenzstation (30.1.2007)	27
Abb. 4-4	Untersuchungsgebiete im Rostocker Hafen	30
Abb. 4-5	Messaufbau der mobilen Referenzstation	31
Abb. 4-6	Lage der Referenzstation (Messbus) und der IGS-Station (WARN) im Rostocker Hafen.	31
Abb. 4-7	Forschungsschiff „Prof. A. Penck“ des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde	32
Abb. 4-8	Antenneninstallation auf Vormast	32
Abb. 4-9	Messaufbau an Bord des Forschungsschiffes „Prof. A. Penck“	33
Abb. 4-10	Videosystem	33
Abb. 4-11	Innenaufbau der Messtechnik an Bord des IOW Forschungsschiff "Professor Albrecht Penck"	34
Abb. 4-12	Erhöhte Mehrwegefehler an der Referenzstation zugeordnet zu Elevations- und Azimutwinkeln des getrackten GNSS-Signals	35
Abb. 4-13	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 23) für die C/A-Rangemessungen (01.02.2007)	35
Abb. 4-14	HDOP-Werte aller Rover-Empfänger für alle Messtage	36
Abb. 4-15	Häufigkeit der horizontalen Positionsfehler für zweifrequenzbasierte „stand alone“ GPS/GLONASS-Positionierung unter Verwendung des „Carrier Smoothing“-Verfahrens (links) und phasen und zweifrequenzbasiertes DGPS (rechts)	38
Abb. 4-16	Seekanal: Einfahrt in das Untersuchungsgebiet im Rostocker Hafen	38
Abb. 4-17	Grundlegende Systemarchitektur des maritimen GBAS	40
Abb. 4-18	Blockschaltbild des GBAS HW-Gesamtsystemarchitektur	41
Abb. 4-19	Ausgewählte GNSS-Empfänger (TOPCON EGGD, TOPCON NetG3, Javad TRIUMPH)	43
Abb. 4-20	Ausgewählte GNSS-Antennen (Javad GrAnt, TOPCON CR-G3 – ohne und mit Radome)	44
Abb. 4-21	4-fach Antennenverteiler (GPS Networking)	44
Abb. 4-22	Frequenznormal (Temex LPRFS)	45
Abb. 4-23	Wetterstation (EPSA Datenlogger & Außensensor)	45
Abb. 4-24	Funkmodem (Satel 3AS (d))	46
Abb. 4-25	Monitoringsstationsserver (DELL Power Edge 1950)	46
Abb. 4-26	Prozessierungsserver (L&S Computersysteme)	47
Abb. 4-27	RAID Server (DELL Power Edge 2900)	47
Abb. 4-28	RAID Server (Avocent Console Server, Avocent Schaltbare Steckdosenleiste)	48
Abb. 4-29	Mobiler Rechner (Wortmann Terra Mobile)	48
Abb. 4-30	UMTS Router (Linksys)	49
Abb. 4-31	Ethernet-Switch (D-Link)	49
Abb. 4-32	USV (APC 2200, Smart Slot Triple Chassis)	49
Abb. 4-33	Schranküberwachung (Knürr RMS Compact)	50
Abb. 4-34	DSL Router (Speedport W 700 V)	50
Abb. 4-35	Spektrum Analyzer (SPEKTRAN HF 6080)	51
Abb. 4-36	Allgemeine Struktur von EVnet-basierten Netzwerken zur Prozessierung von GNSS-Daten und Bereitstellungen GNSS-basierter Dienste	53

Abb. 4-37	Lage des ALEGRO GBAS Bodensegments (ALEGRO Referenzstation GHRO) im Bereich des Rostocker Hafens	55
Abb. 4-38	Standort der GNSS-Antenne, des Wettersensors und der Funkantenne (Luftbildansicht)	55
Abb. 4-39	Standort der GNSS-Antenne, des Wettersensors und der Funkantenne (Gebäudeansicht)	56
Abb. 4-40	Außensensoren des GBAS Bodensegments	56
Abb. 4-41	Art der von GNSS-Empfänger genutzten Positionslösungsmethode zur Kontrolle des Empfangs und der Nutzung von RTK Signalen	58
Abb. 4-42	Basiskonzept zum Aufbau des ALEGRO GBAS inklusive Darstellung wesentlicher Datenprozessierungsfunktionen	59
Abb. 4-43	Basiskonzept für das GNSS- und GBAS-Echtzeitmonitoring	59
Abb. 4-44	Prinzipielles Blockschaltbild zur HW Verschaltung des ALEGRO GBAS Bodensegments	61
Abb. 4-45	GBAS Monitorstation	62
Abb. 4-46	EVnet basiertes Operatorinterface zur Steuerung und zum Monitoring der Datenströme der Monitorstation sowie des Prozessierungssystems	64
Abb. 4-47	GUI (virt-manager) zum starten, überwachen, konfigurieren und steuern aller virtuellen Maschinen des virtuellen Plattformservers	65
Abb. 4-48	Verfahrensprinzip 1 bei der Rohdatenpreprozessierung am Beispiel der Phasenrate	68
Abb. 4-49	Coderausachen und 4-Sigma-Grenze, PRN2, 01.02.2007, GEG, 7-8 Uhr, C/A-Code	70
Abb. 4-50	L1-Phasenrauschen normiert auf den 4-fachen Wert der Kurzzeitstandardabweichung, PRN11 31.10.2003, Tromsø	73
Abb. 4-51	Standardabweichung des in Echtzeit bestimmten Phasenrauschen an Bord des Forschungsschiffs „Prof. A. Penck“	73
Abb. 4-52	Permutierte Datenausgabe	75
Abb. 4-53	Variation der empfangenen Signalleistung während eines Satellitendurchgangs und zugeordnet abgeleiteter S4-Index	76
Abb. 4-54	Verlauf der Signalleistung und des in Echtzeit bestimmten normierten Phasenrauschens (GPS PRN 1, 31. Okt. 2003)	76
Abb. 4-55	Beispiel für den Zeitverlauf quantifiziert bereitgestellter SNR-Werte	78
Abb. 4-56	Zukünftig genutzte Frequenzbänder für GNSS-Signale	78
Abb. 4-57	Ionosphärischer Ausbreitungsfehler (IPE) direkt aus den codephasenbasierten Entfernungsmessungen abgeleitet	80
Abb. 4-58	Ionosphärischer Ausbreitungsfehler (IPE) direkt aus den trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen abgeleitet	80
Abb. 4-59	In Echtzeit geschätzter Mehrwegefehler für PRN 23 von 2 an einer Antenne betriebenen GNSS-Empfänger	84
Abb. 4-60	In Echtzeit geschätzter Mehrwegefehler (Zweifrequenzansatz) für PRN 23 von 2 an einer Antenne betriebenen GNSS-Empfänger	85
Abb. 4-61	In Echtzeit bestimmte TEC-Werte (rechts) und Zeitverlauf der „Gain“-Kontrolle (links)	88
Abb. 4-62	TEC-Raten direkt abgeleitet aus Phasenmessungen	88
Abb. 4-63	STEC-Rate	88
Abb. 4-64	Algorithmus zur Gewinnung von Qualitätskenngrößen	90
Abb. 4-65	Positionsfehler an der GBAS-Referenzstation (ohne DIA)	92
Abb. 4-66	Positionsfehler an der GBAS-Referenzstation (mit DIA)	92
Abb. 4-67	Positionsfehler und Protection Levels	98
Abb. 4-68	Weltkartenplot zur Darstellung des Satellitenstatus aller im Orbit verfügbaren GNSS-Satelliten (hier GPS)	99
Abb. 4-69	Polarplot an der GBAS-Referenzstation sichtbaren GPS-Satelliten sowie farblich kodierte Datenvollständigkeit bestimmt durch A-GPAF	99
Abb. 4-70	Pop-Up Information zur Darstellung der Vollständigkeit akquirierter Signalgrößen (GPS PRN 24)	100
Abb. 4-71	Grafische Ausgabe der DOP-Werte	101
Abb. 4-72	Startfenster zur Anzeige prozessierter Signale und Signalkenngrößen	101
Abb. 4-73	Statusanzeige prozessierter Signale und Signalkenngrößen	103
Abb. 4-74	Anzeige der gemessenen Signalamplitude (Messgröße) des CA-Codes für alle Satellitenlinks über der Zeit	105

Abb. 4-75	Anzeige des Phasenrauschen auf L1 für alle Satellitenlinks als Momentanwertdarstellung (schwarz) und der Kurzzeitstandardabweichung (blau)	105
Abb. 4-76	Anzeige des Phasenrauschen auf L1 für einen spezifischen Satelliten (schwarz) und der Kurzzeitstandardabweichung (blaue Hüllkurve) über der Zeit	106
Abb. 4-77	Flagstatus der Trägerphaseprozessierung auf L1 und L2 incl. der Anzeige aufgetretener Cycle Slips über 24 h (0.00 – 24.00 Uhr GPS-Zeit)	106
Abb. 4-78	Anzeige des abgeschätzten Mehrwegefehlers aller linkspezifischen Messwerte von L1 über der Zeit	107
Abb. 4-79	Startfenster zur Anzeige positionsrelevanter Größen der ALEGRO Referenzstation	108
Abb. 4-80	Horizontaler Positionsfehler (Punktwolke) sowie Anzahl sichtbarer Satelliten, HDOP-Werte und Verfügbarkeit der Positionslösung über der Zeit	108
Abb. 4-81	Horizontaler Positionsfehler und richtungsabhängige Fehleranteile sowie Anzahl sichtbarer Satelliten, HDOP-Werte und Verfügbarkeit der Position über der Zeit	109
Abb. 4-82	Dreidimensionaler Positionsfehler und höhenspezifischer Fehleranteil sowie Anzahl sichtbarer Satelliten, HDOP-Werte und Verfügbarkeit der Position über der Zeit	109
Abb. 4-83	Detaillierte Architektur der GBAS-Borsteinheit	112
Abb. 4-84	Prinzipielles Blockschaltbild zur HW Verschaltung des ALEGRO GBAS Nutzersegments	116
Abb. 4-85	HW des GBAS Nutzersegments	116
Abb. 4-86	Differentielle GNSS-Verfahren	117
Abb. 4-87	Blockschaltbild nutzerseitige Positionsbestimmung	120
Abb. 4-88	Prozessierungskette für eine SPS-basierte Positionsbestimmung	121
Abb. 4-89	Einfache Differenzbildung	122
Abb. 4-90	Doppelte Differenzbildung	122
Abb. 4-91	Gesamtübersicht RTK Algorithmus	123
Abb. 4-92	Positionsfehler (DIA ausgeschaltet)	124
Abb. 4-93	Positionsfehler (DIA eingeschaltet)	124
Abb. 4-94	Grafisches Nutzerinterface des ALEGRO GBAS Nutzersegments	127
Abb. 4-95	Scatterplotdarstellung des horizontalen Positionsfehlers	128
Abb. 4-96	ALEGRO GBAS Nutzersegment - Chartdarstellung aller Positionsfehler über der Zeit	129
Abb. 4-97	ALEGRO GBAS Nutzersegment - Scatterplotdarstellung und Trajektorien des 2D Position auf einer Karte	129
Abb. 8-1	Realisierte, in Bearbeitung befindliche und geplante (blau) FuE-Beiträge des DLR abgebildet auf Projekte und Vorhaben des Forschungshafens Rostock	143

**Tabellenverzeichnis:**

<i>Tab. 1-1 Maritime Nutzeranforderung an GNSS-basierte Navigation ([IMO A.915(22)], Annex 2)</i>	12
<i>Tab. 1-2 Maritime Nutzeranforderung an GNSS-basierte Positionierung für Schiffsführung und Verkehrsmanagement ([IMO A.915(22)], Annex 3)</i>	13
<i>Tab. 1-3 Maritime Nutzeranforderung an GNSS-basierte Positionierung für u.a. Hafenprozesse und Unfallanalysen ([IMO A.915(22)], Annex 3)</i>	13
<i>Tab. 1-4 Prognostizierte Genauigkeitsstufen für GALILEO und für lokale, GALILEO-basierte Assistenzdienste [Klepsvik-2004]</i>	14
<i>Tab. 3-1 Europäische Projekte mit SBAS/GBAS-Bezug im maritimen Kontext</i>	21
<i>Tab. 3-2 IALA Bewertung von DGNSS-Lösungsansätzen (X – abhängig von der Implementierungsart)</i>	21
<i>Tab. 4-1 Erforderliche Komponenten für GBAS Boden- und Nutzersegment</i>	41
<i>Tab. 4-2 Technische Komponenten des Bodensegments</i>	51
<i>Tab. 4-3 Technische Komponenten des Nutzersegments</i>	52
<i>Tab. 4-4 Technische Komponenten des Boden- und Nutzersegments</i>	52
<i>Tab. 4-5 Geozentrische &amp; kartesische Koordinaten des Antennenmesspunktes der ALEGRO Referenzstation (GHRO) in WGS 84</i>	57
<i>Tab. 4-6 Hauptbetriebskomponenten zur Steuerung und Überwachung des GBAS Bodensegments</i>	62
<i>Tab. 4-7 Remote Zugangsmöglichkeiten auf die ALEGRO Referenzstation</i>	63
<i>Tab. 4-8 Ausgangsdaten des Range-Preprozessors</i>	69
<i>Tab. 4-9 Anzahl an nicht erklärbaren Ausreißern, 24-h-Aufzeichnung, Basisstation, 01.02.2007</i>	71
<i>Tab. 4-10 Ausgangsdaten des Phasen-Preprozessors</i>	71
<i>Tab. 4-11 Ausgangsdaten des Amplituden-Preprozessors</i>	74
<i>Tab. 4-12 Ausgangsdaten des SNR-Preprozessors</i>	77
<i>Tab. 4-13 Ausgangsdaten des Prozessors „Single Frequency Carrier Smoother“</i>	83
<i>Tab. 4-14 Ausgangsdaten des Prozessors „Dual Frequency Carrier Smoother“</i>	84
<i>Tab. 4-15 Ausgangsdaten des STEC-Prozessors</i>	86
<i>Tab. 4-16 Ausgangsdaten des DOP-Prozessors</i>	94
<i>Tab. 4-17 Ausgangsdaten des RAIM-Moduls</i>	96
<i>Tab. 4-18 Darstellbare Signalkenngrößen</i>	101
<i>Tab. 4-19 Darstellungsgrößen des SISA GUI</i>	104
<i>Tab. 4-20 Komponenten des GBAS-Nutzersegmentes (Standardmodus)</i>	112
<i>Tab. 4-21 In erweiterten Betriebsarten der GBAS-Nutzersegmentes notwendige Komponenten</i>	113
<i>Tab. 4-22 SW-Komponenten des GBAS-Nutzersegmentes</i>	113
<i>Tab. 4-23 Aktuell dekodierte Nachrichtentypen des RTCM-Decoders (3.0)</i>	125
<i>Tab. 6-1 Öffentliche Technische Berichte (Public)</i>	135
<i>Tab. 6-2 Technische Berichte (Spezifische Ergebnisberichte)</i>	135
<i>Tab. 6-3 Interne Technische Berichte</i>	136
<i>Tab. 9-1 Veröffentlichungen</i>	143

**Abkürzungen:**

AIS	–	Automatic Identification System
ALEGRO	–	Aufbau eines lokalen maritimen Ergänzungssystems zur Unterstützung hochpräziser GALILEO-Anwendungen und -Dienste im Forschungshafen Rostock
ascos	–	Satellitenpositionierungsdienst der AxioNet GmbH
ASMS	–	Advanced Sailing Management System
CeMARIS	–	Center for Marine Information Systems, Interdisziplinäres Forschungszentrum an der Universität Rostock
DGNSS	–	Differentielles GNSS
DLR	–	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ERA-NET	–	European Research Area Networks
ESA	–	European Space Agency
EVnet	–	Experimentier- und Verifikationsnetzwerk
FFIM	–	Far Field Integrity Monitoring
GALILEO	–	Europäisches GNSS
GBAS	–	Ground Based Augmentation System
GNSS	–	Global Navigation Satellite System(s)
GLONASS	–	Globales Navigationssatellitensystem (russisches GNSS)
GPS	–	Global Positioning System (US-amerikanisches GNSS)
HAL	–	Horizontal Alert Limit
HPL	–	Horizontal Protection Level
HW	–	Hardware
IALA	–	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
IEC	–	International Electrotechnical Commission
IKN	–	Institut für Kommunikation und Navigation
IMO	–	International Maritime Organisation
ITU	–	International Telecommunication Union
LAN	–	Local Area Network
LBAS	–	Location Based Augmentation System
LIM	–	Local Integrity Monitoring
MARTEC	–	Forschungsprogramm „Maritime Technology“ im europäischen ERA-NET Programm
NBL	–	Neue Bundesländer
NMEA	–	National Marine Electronics Association
OS	–	Open Service (GALILEO)
RAIM	–	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RTCM	–	Radio Telecommunication Commission for Maritime Services
RTK	–	Real Time Kinematic
SAPOS	–	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SBAS	–	Satellite Based Augmentation System
SEA GATE	–	Projekt im FH Rostock ausgerichtet auf die Entwicklung und den Aufbau eines Pseudolite basierten GBAS



SoL	–	Safety of Life (GALILEO)
SW	–	Software
TTC	–	Trimble Total Control (Postprozessierungs-Software)
USV	–	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UTC	–	Temps Universel Coordonné, Koordinierte Weltzeit
VDR	–	Voyage Data Recorder
VPL	–	Vertical Protection Level
VTMS	–	Vessel Traffic Management System

## **Zusammenfassung**

Das Projekt ALEGRO wurde durch das Wirtschaftsministerium des Landes Mecklenburg-Vorpommern (FKZ: V230-360-08-TIFA-560) gefördert und durch das Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. im Zeitraum 1.11.2006 bis 30.09.2008 durchgeführt.

Ziel des Projekts ALEGRO war der Aufbau eines lokalen Ergänzungssystems (GBAS-Ground Based Augmentation System), das die Entwicklung von hochpräzisen und sicherheitskritischen GNSS- und GALILEO-Anwendungen im maritimen Sektor und insbesondere im Hafen Rostock unterstützt. ALEGRO, wie auch das bei EADS Rostock Systemtechnik (RST) durchgeführte Vorhaben SEA GATE, waren dabei auf den prototypischen Aufbau von Ground Based Augmentation Systemen (GBAS) ausgerichtet, wobei der wesentliche Unterschied zwischen beiden Projekten in den verfolgten technologischen Lösungsansätzen besteht. Thematischer Schwerpunkt von SEA GATE ist der Einsatz und die Nutzung von Pseudolites als ergänzende Signalquellen für eine GNSS-basierte Ortung. Thematischer Schwerpunkt von ALEGRO ist die Weiterentwicklung von auf differentiellen, phasenbasierten Echtzeitkorrekturverfahren basierenden GBAS (auch RTK-Verfahren (Real Time Kinematic) genannt) insbesondere in Hinblick auf die für sicherheitskritische Anwendungen notwendige Integritätsfassung und -bewertung.

Wesentliche Arbeitsinhalte des Projekts waren der HW- und SW-technische Aufbau eines GBAS-Experimentalsystems Hafen Rostock, die Entwicklung und Implementierung einer „GNSS Performance Assessment Facility“ als Grundelement für das Integritätsmonitoring von GNSS selbst und weiterführend des GBAS sowie die Planung, Durchführung und Auswertung experimentell gestützter Validierungsmaßnahmen in Form von Messkampagnen, Experimenten und Probetrieb zum Leistungsnachweis einzelner Komponenten sowie des ALEGRO GBAS-Gesamtsystems.

Im Rahmen des hier erstellten Endberichts werden wesentliche durch das Projekt ALEGRO vorgenommene Entwicklungen beschrieben und erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Im Kapitel 1 werden die Ziele des Projektes und daraus abgeleitete Aufgaben zusammenfassend dargestellt. Anhand bestehender Nutzeranforderungen, die durch die Internationale Maritime Organisation bereits spezifiziert wurden, wird der auch zukünftig notwendige Einsatz von Ground Based Augmentation Systems begründet sowie der damit verbundene Forschungsbedarf erläutert.

Im Kapitel 2 werden die Projektvoraussetzungen aus verschiedenen Sichtweisen behandelt. Dazu gehören einerseits die Expertisen und Ausrüstungen des Instituts für Kommunikation und Navigation, auf denen ALEGRO aufbaut. Andererseits wird noch mal auf die Bedeutung der Integrität eingegangen, die insbesondere bei sicherheitskritischen Verkehrsanwendungen von GNSS ein Entwicklungs- als auch Zulassungsschwerpunkt darstellt. Ergänzend wird auf bereits praktizierte DGPS-Dienste (IALA Beacon und AIS DGNSS Systeme) und dort bisher verwendeten Integritätskonzepte eingegangen.

Der internationale Stand zum Projektbeginn wird im Kapitel 3 zusammenfassend anhand bereits etablierter maritimer GBAS-Dienste, Erwartungen an das GALILEO-System sowie durchgeführter bzw. laufender Projekte im europäischen Rahmen dargestellt. Abschließend wird die mit ALEGRO verfolgte FuE-Aufgabenstellung durch Herausarbeitung der wesentlichen Unterschiede zum Stand der Technik verteidigt.

Im Kapitel 4 erfolgt eine komprimierte Beschreibung der im Projekt ALEGRO umgesetzten Aufgaben sowie der erreichten Ergebnisse. Ausgehend von einer Einordnung der einzelnen Arbeiten in die Gesamtzielstellung werden diese dann anhand durchgeführter Voruntersuchungen, des aufgebauten GBAS-Experimentalsystems bestehend aus Boden-

und Bordsystem, dafür notwendiger Algorithmenentwicklungen und ihrer Umsetzung als Echtzeitprozessoren sowie erzielter Validierungsergebnisse beschrieben. Durch den Umfang der Arbeiten ist eine detaillierte Darstellung aller Aufgaben in diesem Dokument nicht sinnvoll. Jedoch sei bereits hier auf die im Kapitel 6.3 aufgelistete Ergebnisdokumentation des Projekts ALEGRO verwiesen, die Entwicklungsinhalte und erzielte Ergebnisse einzelner Projektaufgaben detaillierter darlegen.

Im Kapitel 5 erfolgt aus Sicht des Auftragnehmers eine zusammenfassende Bewertung der im Projekt erzielten Ergebnisse in Bezug auf die im ursprünglichen Projektantrag spezifizierten Aufgaben und Zielstellungen. Diese bildet auch die Grundlage, um weiteren Entwicklungsbedarf und notwendige Maßnahmen zu identifizieren, die für eine wirtschaftliche Produkt- bzw. Serviceeinführung und damit für eine wirtschaftliche Verwertung der FuE-Ergebnisse als weiterführend notwendig erscheinen.

Die Auswertung, Nutzung und Verbreitung der erzielten FuE-Ergebnisse des Projekts ALEGRO wird anhand erstellter Publikationen (siehe auch Kapitel 9) und Dokumente, bereitgestellter Datenprodukte sowie bewerteter Vermarktungsaussichten im Kapitel 6 dargelegt. Ergänzend wird auf den durch ALEGRO entstandenen Mehrwert für das DLR als FuE-Unternehmen eingegangen. Die Auswirkungen dieses Projekts auf die Beschäftigten am DLR Standort Neustrelitz werden gesondert im Kapitel 7 näher erläutert.

Aufbauend auf den im Kapitel 5 Ergebnisbewertungen widmet sich Kapitel 8 verstärkt der weiterführenden, strategischen Konsolidierung der mit ALEGRO begonnenen Entwicklungslinie im maritimen GBAS-Sektor. Diese wird sowohl inhaltlich als auch anhand bereits eingeleiteter Maßnahmen wie Folgeprojektanträge und aufzubauender Arbeits- und Kooperationsstrukturen näher erläutert. Abschließend erfolgt im Kapitel 10 abschließend die Quellenangabe der in diesem Bericht referierten Literatur.

In der Anlage A wird kurz das für IALA DGNSS angewendete Integritätskonzept erläutert. Dies ist erforderlich, um den Status quo bezüglich der Handhabung der Integritätsüberwachung zu kennen und daraus abgeleitete Entwicklungsentscheidungen im Projekt ALEGRO nachvollziehen zu können.

Anhand der Darlegungen in den Kapiteln 1 bis 10 kann zusammenfassend festgestellt werden, dass das Projekt ALEGRO seine fachlichen Projektziele erreicht hat. Kleinere Abweichungen positiver als auch negativer Art sind in der Regel technisch begründet oder ergaben sich aus der Verfügbarkeit kommerziell zu beschaffender Technik und zur Erprobung nutzbarer Satellitennavigationssysteme. Sie führten jedoch nicht zur Änderung oder Aufgabe von ursprünglich verfolgten Projektzielen.

An dieser Stelle sollte explizit darauf hingewiesen werden, dass der Erfolg von ALEGRO auch aus folgenden Unterstützungsleistungen kooperierender Einrichtungen resultierte:

- Für die kooperative Mitnutzung des Forschungsschiffs „Prof. A. Penck“ während der Initialmesskampagne gilt unser besonderer Dank dem Institut für Ostseeforschung und der Briese Schifffahrtsgesellschaft mbH & Co. KG.
- Der Hafenentwicklungsgesellschaft Rostock danken wir für die Bereitstellung geeigneter Räume zum Aufbau des GBAS-Experimentalsystem und für die komplikationslose Gewährung von Zutrittsrechten für DLR-Mitarbeiter in den Überseehafen Rostock, die für experimentelle Untersuchungen im Projektrahmen erforderlich wurden.
- Unser Dank gilt auch dem Schiffartsinstitut Warnemünde e.V. und der Hochschule Wismar (Fachbereich Seefahrt), mit denen uns bereits seit 2003 ein Kooperationsvertrag verbindet und die durch einen offenen Erfahrungsaustausch uns die Einarbeitung in maritime Nutzungsanforderungen und Standards erheblich erleichterten.

# 1 Ziele der Projektarbeiten

Ziel des Projekts ALEGRO war der Aufbau eines lokalen Ergänzungssystems (GBAS-Ground Based Augmentation System), das die Entwicklung von hochpräzisen und sicherheitskritischen GNSS- und GALILEO-Anwendungen im maritimen Sektor und insbesondere im Hafen Rostock unterstützt.

ALEGRO, wie auch das bei EADS Rostock Systemtechnik (RST) durchgeführte Vorhaben SEA GATE, waren dabei auf den prototypischen Aufbau von Ground Based Augmentation Systemen (GBAS) ausgerichtet, wobei der wesentliche Unterschied zwischen beiden Projekten in den verfolgten technologischen Lösungsansätzen besteht. Thematischer Schwerpunkt von SEA GATE ist der Einsatz und die Nutzung von Pseudolites als ergänzende Signalquellen für eine GNSS-basierte Ortung. Thematischer Schwerpunkt von ALEGRO ist die Weiterentwicklung von auf differentiellen, phasenbasierten Echtzeitkorrekturverfahren basierenden GBAS (auch RTK-Verfahren (Real Time Kinematic) genannt) insbesondere in Hinblick auf die für sicherheitskritische Anwendungen notwendige Integritätsbewertung und –bewertung.

Der Bedarf an neuen technologischen Lösungen im GBAS-Sektor ergibt sich aus den bereits 2002 spezifizierten Minimalanforderungen (Tab. 1-1 bis Tab. 1-3) der Internationalen Maritimen Organisation (IMO) an zukünftige Satellitennavigationssysteme [IMO A.915(22)].

**Tab. 1-1 Maritime Nutzeranforderung an GNSS-basierte Navigation ([IMO A.915(22)], Annex 2)**

	System level parameters				Service level parameters			Fix interval <sup>2</sup> (seconds)
	Absolute Accuracy	Integrity			Availability % per 30 days	Continuity % over 3 hours	Coverage	
	Horizontal (metres)	Alert limit (metres)	Time to alarm <sup>3</sup> (seconds)	Integrity risk (per 3 hours)				
Ocean	10	25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A <sup>1</sup>	Global	1
Coastal	10	25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A <sup>1</sup>	Global	1
Port approach and restricted waters	10	25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Regional	1
Port	1	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Local	1
Inland waterways	10	25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Regional	1

Bereits an den Anforderungen für Hafenbereiche ist erkennbar, dass die geforderte Genauigkeit von besser 1 m für die GNSS-basierte Positionsbestimmung bei gleichzeitiger Gewährleistung der Verlässlichkeit (Integrität) nicht mit einer alleinigen Nutzung von GNSS und auch von GALILEO erreichbar sein wird. Integrität meint in diesem Kontext, dass der GNSS-Systembetreiber den Systemstatus überwachen und systembedingte Fehlfunktionen in Echtzeit erkennen muss, die letztlich zu einem Genauigkeitsverlust über das 2.5-fache der gestellten Genauigkeitsanforderung führt. Über derartige GNSS-Zustandsänderungen ist der Endnutzer innerhalb von 10 s zu informieren.

Nicht enthalten in dieser Integritätsbewertung sind Effekte, die sich aus den lokalen Ausbreitungs- und Umgebungsbedingungen (Ionosphäre, Troposphäre, Mehrwegeausbreitung, Interferenzen, Jamming) ergeben oder auch Fehlfunktionen der eingesetzten GNSS-Sensorik sein können. Die Mitbehandlung dieser Effekte ist aber zwingend erforderlich, da letztlich die nutzerseitig erreichbare Genauigkeit und Integrität GNSS-basierter Ortung als alleiniges Maß für die Anwendbarkeit, Zulassung und auch Akzeptanz von neuen Technologien zu betrachten ist.

Für die Ortung im Rahmen spezieller Hafenprozesse wie die Automatisierung von Schiffsanlegemanövern oder die Realisierung von Güterumschlagsprozessen (siehe Tab. 1-2

und Tab. 1-3) werden sogar horizontale als auch vertikale Positionsgenauigkeiten besser als 0.1 m bei gleichzeitig zu gewährleistender Integrität gefordert.

**Tab. 1-2 Maritime Nutzeranforderung an GNSS-basierte Positionierung für Schiffsführung und Verkehrsmanagement ([IMO A.915(22)], Annex 3)**

	System level parameters					Service level parameters			
	Accuracy		Alert limit (metres)	Integrity		Availability % per 30 days	Continuity % over 3 hours	Coverage	Fix interval <sup>2</sup> (seconds)
	Horizontal (metres)	Vertical <sup>1</sup> (metres)		Time to alarm <sup>3</sup> (seconds)	Integrity risk (per 3 hours)				
<b>Operations</b>	<b>Relative accuracy</b>								
• tugs and pushers	1		2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Local	1
• icebreakers	1		2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Local	1
• automatic collision avoidance	10		25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Global	1
	<b>Absolute accuracy</b>								
• track control	10	N/A	25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Global	1
• automatic docking	0.1		0.25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Local	1
<b>Traffic management<sup>3</sup></b>	<b>Absolute accuracy</b>								
• ship-to-ship co-ordination	10		25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Global	1
• ship-to-shore co-ordination	10		25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Regional	1
• shore-to-ship traffic management	10		25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	99.97	Regional	1

**Tab. 1-3 Maritime Nutzeranforderung an GNSS-basierte Positionierung für u.a. Hafenprozesse und Unfallanalysen ([IMO A.915(22)], Annex 3)**

	System level parameters					Service level parameters			
	Accuracy		Alert limit (metres)	Integrity		Availability % per 30 days	Continuity % over 3 hours	Coverage	Fix interval <sup>2</sup> (seconds)
	Horizontal (metres)	Vertical (metres)		Time to alarm <sup>3</sup> (seconds)	Integrity risk (per 3 hours)				
<b>Port operations</b>	<b>Absolute accuracy</b>								
• local VTS	1	N/A	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Local	1
• container/cargo management	1	1	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Local	1
• law enforcement	1	1	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Local	1
• cargo handling	0.1	0.1	0.25	1	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Local	1
<b>Casualty analysis</b>	<b>Predictable accuracy</b>								
• ocean	10	N/A	25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Global	1
• coastal	10	N/A	25	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Global	1
• port approach and restricted waters	1	N/A	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Regional	1
<b>Offshore exploration and exploitation</b>	<b>Absolute accuracy</b>								
• exploration	1	N/A	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Regional	1
• appraisal drilling	1	N/A	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Regional	1
• field development	1	N/A	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Regional	1
• support to production	1	N/A <sup>4</sup>	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Regional	1
• post-production	1	N/A <sup>4</sup>	2.5	10	10 <sup>-5</sup>	99.8	N/A	Regional	1

Die hohen, jedoch lokal begrenzten IMO-Anforderungen an die Genauigkeit und Verlässlichkeit GNSS-basierter Ortung und Navigation im Hafenbereich als auch die Notwendigkeit der Überwachung des GNSS unter Berücksichtigung von lokalen Besonderheiten begründen nach wie vor den Bedarf an lokalen Ergänzungssystemen und ihrer anwendungsorientierten Weiterentwicklung.

Prognostizierte Genauigkeitsstufen (Simulation) für GALILEO-basierte Assistenzsysteme im Sinne von GBAS und für die „stand alone“-Nutzung von GALILEO sind in Tab. 1-4 dargestellt.

**Tab. 1-4 Prognostizierte Genauigkeitsstufen für GALILEO und für lokale, GALILEO-basierte Assistenzdienste [Klepsvik-2004]**

SERVICE	GLOBAL Dual Frequency Code	LOCAL Dual Frequency Differential Code	LOCAL Dual Frequency Differential Carrier
Horizontal Accuracy (95%)	4m	0.5m	0.10m
Vertical Accuracy (95%)	8m	0.75m	0.15m

Die daraus direkt abgeleitete Zielstellung des Projekts ALEGRO umfasst den Ausbau eines experimentellen GBAS im Hafengebiet Rostock und seine verfahrenstechnische Weiterentwicklung zur Bereitstellung qualitätsbewerteter Korrekturen. Um die Zielstellung des Projekts zu erreichen, wurden folgende Aufgaben zu Projektbeginn identifiziert:

1. Aufbau eines GBAS-Experimentalsystems im Hafen Rostock als Grundlage für die Datengewinnung und -analyse im maritimen Anwendungsumfeld: Um den Entwicklungsaufwand im Rahmen zu halten, stützt sich die Infrastruktur für die Aufzeichnung, Prozessierung und Verteilung von Daten dabei auf das vom DLR entwickelte Experimentier- und Validierungsnetzwerk (EVnet) ab. Für das Experimentalsystem wurden als wesentliche Komponenten eine Referenzstation und ein Prozessierungszentrum im Hafen Rostock sowie eine mobile Station als Nutzerplattform vorgesehen.
2. Nutzung dieser Daten, um darauf aufbauend die GNSS-Signale selbst als auch damit erreichbare, jedoch verfahrensabhängige Positionsgenauigkeiten zu bewerten und weiterführend auch zuverlässigkeitskritische Einflüsse zu detektieren.
3. Entwicklung und Implementierung einer „GNSS Performance Assessment Facility“ (GPAF) in das GBAS, die in Echtzeit die Qualität der GNSS-Signale und fortführend die erreichbaren Positionsgenauigkeiten anhand dedizierter Qualitätskenngrößen beschreibt.
4. Bereitstellung und Archivierung dieser Qualitätskenngrößen, um einerseits über Referenzdaten zu verfügen sowie diese auch Forschungshafennutzern bereitzustellen und um andererseits eine Langzeitdatenbasis aufzubauen, auf deren Grundlage zukünftig Standardisierungs- und Zulassungsprozesse unterstützt werden.
5. Ausführung von ersten Analysen, inwieweit diese Qualitätskenngrößen zu einer situationsangepassten Steuerung und Optimierung der im GBAS implementierten Verfahren in den Bereichen Fehler- und Ausreißerdetektion, Korrekturdatenbereitstellung und Integritätsüberwachung beitragen können.
6. Entwicklung und Implementierung von prototypischen RTK-Verfahren, die weitestgehend systemneutral (GPS, GLONASS, GALILEO) einsetzbar sind und durch geeignete Schnittstellengestaltung bereits heute für multi-carrier basierte Verfahrensweiterentwicklungen im Kontext von GALILEO und GPS 3 vorbereitet sind.
7. Entwicklung und Implementierung erster Funktionalitäten zum Integritätsmonitoring genutzter GNSS sowie des GBAS.
8. Planung, Durchführung und Auswertung experimentell gestützter Validierungsmaßnahmen in Form von Messkampagnen, Experimenten und Probebetrieb in Bezug auf einzelne Verfahrensentwicklungen, auf die Leistungsfähigkeit des prototypischen GBAS sowie auf spezifische Nutzungsszenarien.

Aus Budget- und Zeitgründen wurde bereits im Projektantrag darauf hingewiesen, dass die Weiterentwicklung der Algorithmen und Verfahren in Richtung sicherheitskritischer Validierung erst in Anschlussprojekten erfolgen kann.

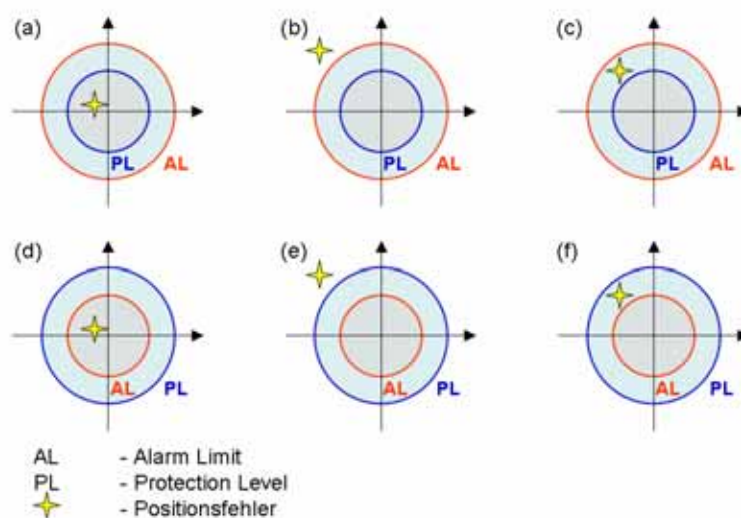
Die über das Projekt ALEGRO hinausgehende, weiterführende Zielstellung der FuE-Linie „Maritimes GBAS“ ist die Mitgestaltung zukünftiger GBAS-Standards im maritimen Anwendungssektor (siehe Kapitel 3) unter Einbeziehung des Leistungspotenzials modernisierter und zukünftiger Satellitennavigationssysteme wie GPS 3 und GALILEO. Dieser Prozess, der auf der Entwicklung und experimentellen Erprobung verschiedener Lösungs- und Verfahrensansätze beruhen wird, wird letztlich darüber entscheiden, welche der neuen technologischen Lösungen in die maritimen Standards aufgenommen wird und für maritime Anwendungen sie letztlich zugelassen werden. Mit dem in ALEGRO geschaffenen experimentellen GBAS wird die notwendige Grundlage geschaffen, die Bewertung der Leistungsfähigkeit differentieller, phasenbasierter Verfahren vorzunehmen. Dies ist eine Grundvoraussetzung, um marktfähige Produkte im Sinne von neuen GNSS-Diensten und dafür notwendiger Komponenten bereitzustellen und diese einer wirtschaftlichen Verwertung zuführen zu können. Diese kann jedoch erst längerfristig erreicht werden, weil neben dem Nachweis der technischen Machbarkeit auch der zugeordnete Standardisierungs- und Zulassungsprozess umgesetzt werden muss. Ein vergleichbarer Entwicklungs- und Zulassungsprozess erfolgt derzeit im Luftfahrtbereich und ist auf den Übergang von CAT I zur CAT III Landeanflügen mit Hilfe von GBAS fokussiert. Für CAT III werden dabei Entwicklungs- und Zulassungszeiträume weit über 2015 angegeben.

## 2 Voraussetzung und eingesetzte Einrichtungen

GALILEO-relevante FuE-Aktivitäten des DLR Instituts für Kommunikation und Navigation sind einerseits auf die Entwicklung und den Aufbau des europäischen Satellitennavigationssystems GALILEO und andererseits auf sicherheitskritische Anwendungen insbesondere in den verschiedenen Verkehrsbereichen wie Luftfahrt, Eisenbahn und Straßenverkehr ausgerichtet. Allen Verkehrsbereichen gemeinsam ist ihr Bedarf an einer zuverlässigen GNSS-basierten Positionsbestimmung. Damit ist gemeint, dass in Bezug auf die spezifizierten Genauigkeitsanforderungen eine Überwachung und Bewertung der momentan erreichten Positionsgenauigkeit geeignet zu erfolgen hat.

Allgemein betrachtet können dabei die Abb. 2-1 6 verschiedene Systemzustände auftreten. In den ersten 3 Zuständen (a bis c) ist das System als verfügbar und verwendbar gekennzeichnet. Die momentane Bewertung des Positionsfehlers (Protection Level - PL) liegt unter dem tolerierbaren Positionsfehler (Alarm Limit - AL). Jedoch nur im Fall (a) entspricht die Abschätzung dem realen Verhalten des genutzten Systems. In den Fällen (b) und (c) wird jedoch prognostiziert, dass die Leistungsfähigkeit des Systems konform mit seiner Spezifikation ist, obwohl der Positionsfehler im Extremfall (b) sogar über dem tolerierbaren Fehler liegt. Zumindest dieser Fall darf bei Sicherheitsanwendungen überhaupt nicht auftreten.

In den Fällen (d) bis (f) wird das System als nicht nutzbar eingestuft, weil die Bewertung des Positionsfehlers (PL) aussagt, dass seine momentane Leistungsfähigkeit nicht den gestellten Nutzeranforderungen beschrieben durch den tolerierbaren Fehler (AL) entspricht. Jedoch im Fall (d) wäre das System effektiv nutzbar gewesen, da lediglich eine Fehleinschätzung der Systemleistungsfähigkeit vorlag. In den Fällen (e) und (f) wurde das System zu Recht als nicht nutzbar klassifiziert. Jedoch nur im Fall (f) liegt eine korrekte Bewertung vor, weil der PL den wahren Positionsfehler ausreichend beschreibt.



**Abb. 2-1 Zustandsklassifikation bei der Integritätsüberwachung**

Daraus resultiert, dass nur Fall (a) und Fall (f) das Nominalverhalten eines integritätsüberwachten Systems beschreiben und die anderen Fälle Fehlfunktionen bei der Integritätsbewertung darstellen, die letztlich die Verfügbarkeit des Positionsservices (d und e) oder seine Zuverlässigkeit (b und c) reduzieren.



Für verkehrstelematische Anwendungen leiten sich daraus folgende technische Fragestellungen ab:

1. Welche Lösungsansätze sind überhaupt geeignet, die vom Nutzer geforderten Positionsgenauigkeiten unter Beachtung der anwendungsspezifischen Nutzungsbedingungen (Umgebung, statisch/dynamisch, lokal/global) zu erreichen?
2. Mit welchen Methoden und Verfahren können die für den Lösungsansatz genutzten Infrastrukturen und Komponenten hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit (Genauigkeit, Integrität) in Echtzeit verlässlich bewertet werden?
3. Wie kann das aus Nutzersicht für seine Ortung und Navigation genutzte Gesamtsystem, das aus GNSS, GNSS-Diensten und nutzerseitig eingesetzten Kommunikations- und Navigationsempfängern sowie aller dafür erforderlichen Kommunikationsverbindungen besteht, hinsichtlich seiner Gesamtintegrität erfasst werden?

Da im maritimen Bereich nur erhöhte Genauigkeitsanforderungen in lokal begrenzten Bereichen gefordert werden, ist dem Einsatz von lokalen Ergänzungssystemen ähnlich wie in der Luftfahrt der Vorzug zu geben. Diese Aussage lässt sich auch dadurch nachvollziehen, dass im maritimen Sektor IALA Beacon und AIS DGNSS Systeme eingesetzt werden, für die es bereits entsprechende maritime Standards gibt ([IMO MSC.114(73)], [IEC-61108-4], [IALA-R-121]). Diese auf Codekorrekturen aufbauenden Differentialsysteme wurden bereits in den 90-er Jahren entwickelt, um überhaupt mit GPS und insbesondere in Zeiten des eingeschalteten S/A-Effekts (Selective Availability) die für den Küstenbereich erforderlichen Positionsgenauigkeiten von besser als 10 m erreichen zu können.

Bereits in diesen Systemen spielt die Behandlung der Integrität des DGPS-Services und des GPS selbst eine Rolle. Direkt an der Referenzstation selbst bestimmte Indikatoren sind die ermittelten Pseudorange- (PRC) und Rangeraten-Korrekturen (RRC). Überschreiten diese a-priori bestimmte Wertebereiche, so wird der betroffene Satellit als „unmonitored“ gesetzt. Mindestens ein 2. Empfänger wird ausschließlich zum Integritätsmonitoring genutzt. Die Integritätsüberwachung kann dabei als „Local Integrity Monitoring“ (LIM) und als „Far Field Integrity Monitoring“ (FFIM) erfolgen.

Beim LIM wird die Integritätsüberwachung der Referenzstation mittels eines 2. Empfängers am Referenzstationsstandort ausgeführt, der letztlich daraus die Integritätsflags generiert und an die Referenzstation sendet.

- **Positionsalarm:** Überschreitet der radiale Positionsfehler an der Monitoringstation den vom DGNSS-Serviceprovider spezifizierten „Protection Level“ über eine vorgegebene Zeitspanne, so wird das „Position Domain Flag“ gesetzt. Das impliziert, dass das „Station Health Flag“ der Referenzstation im Header der DGNSS-Nachrichten auf „unhealthy“ gesetzt wird.
- **Pseudorangealarm:** Überschreitet der Restfehler in den Pseudoranges oder seinen Raten an der Monitoringstation nach Anwendung der von der Referenzstation bereitgestellten Korrekturgrößen den vom DGNSS-Serviceprovider spezifizierten Schwellwert über eine vorgegebene Zeitspanne, so wird ein satellitenbezogener „Pseudorange Alarm“ ausgelöst. Die Referenzstation setzt dann PRC- und RRC-Korrekturen als „do not use“.
- **Integrity Monitor Feedback:** Die Monitoringstation sendet in regelmäßigen Abständen eine Nachricht an die Referenzstation entsprechend RTCM SC104 RSIM 20. Wird diese nicht durch die Referenzstation empfangen, so wird das „Station Health Flag“ im Header der DGNSS-Nachrichten auf „unmonitored“ gesetzt. Diese Nachricht wird auch verwendet, wenn die Monitoringstation ein Überschreiten des Positions- oder Pseudorangealarms detektiert hat.

Beim FFIM werden ein oder mehrere Empfänger an vom Referenzstandort entfernten Messstandorten betrieben, um Effekte aus der räumlichen Fehlerdekorrelation miterfassen zu können und um damit letztlich die Leistungsfähigkeit des DGNSS im Empfangs- bzw. Servicebereich zu charakterisieren.

Die am Standort der Referenzstation erreichbare Positionsgenauigkeit unter Verwendung der bereitgestellten, codebasierten Korrekturen wird mit rund 1 m angegeben [IALA-R-121]. Daraus ist ableitbar, dass die Nutzung von IALA Beacon DGNSS nicht Submetergenauigkeiten im Hafenbereich im Regelbetrieb ermöglichen wird. Bedingt durch die räumliche Dekorrelation von an der Referenzstation geschätzten Fehlerkorrekturen hängt die nutzerseitig erreichbare Genauigkeit weiterhin von der Entfernung zur Referenzstation ab. Typische Werte für die Fehlerzunahme werden mit rund 1.0 m pro 150 km angegeben und bestimmen letztlich die sinnvolle Größe des Empfangs- und Nutzungsbereiches einer solchen DGPS-Station.

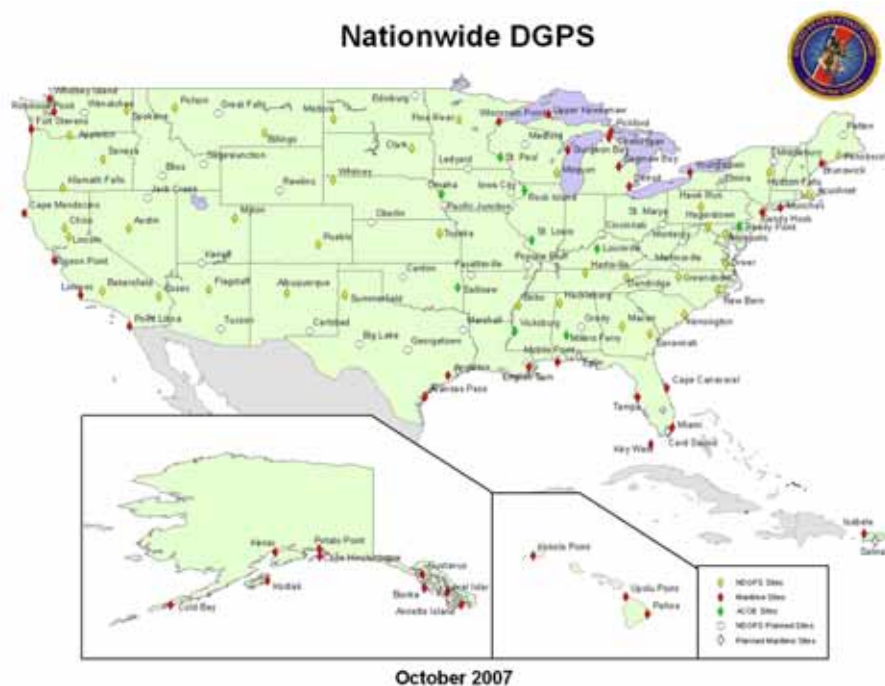
Um Genauigkeiten unter 1 m und möglichst im dm-Bereich sicher erreichen zu können, sind neue Lösungsansätze im Kontext maritimer Ergänzungssysteme zu verfolgen. Entsprechend Tab. 1-4 bietet sich der Ansatz von phasen- und mindestens zweifrequenz-basierten Differentialverfahren auch für maritime Anwendungen im Hafen und im Zulaufbereich an. Dies begründet die mit ALEGRO begonnene Entwicklung eines RTK-basierten GBAS für maritime Anwendungen im Hafen Rostock, wobei sich die im Projekt geplanten FuE-Aktivitäten auf die Lösung der Fragestellungen 1. und 2. konzentrierten.

Um die mit dem Projekt verfolgten Aufgabenstellung effektiv und zielorientiert umsetzen zu können, konnte auf bereits bestehende Expertisen und verfügbare Mess- und Experimentalsysteme des DLR Instituts für Kommunikation und Navigation zurückgegriffen werden. Im Rahmen des DLR internen Projektes GalileoNav (2001-2006) wurden für die Bearbeitung dieses Themas bereits elementare Grundvoraussetzungen geschaffen.

- Mit der Entwicklung und dem Aufbau des Experimentier- und Verifikationsnetzwerkes (EVnet) stand bereits zu Projektbeginn eine wieder verwendbare Experimental- und Demonstrationsplattform zur Verfügung, die das gesamte Datenmanagement von der Steuerung von verteilten Sensoren (GNSS-Empfänger), der integrativen Datenprozessierung bis zur Bereitstellung von spezifischen Datenprodukten steuerungstechnisch für Echtzeitanwendungen unterstützt (siehe u.a. [Noack-2004], [Noack-2005], [Noack-2006]). Durch ihre geplante Verwendung als Entwicklungs- und Demonstrationsplattform für Ergänzungssysteme wurde es möglich, dass dafür notwendige Entwicklungsarbeiten sich auf Modifikationen und Erweiterungen des EVnet-Systems beschränken ließen.
- Für die datenbasierte Validierung von GNSS und eine zukünftige Überwachung der GALILEO-Signalqualität im Kontext der GALILEO-Systemvalidierung wurden bereits erste Algorithmen im Projekt GalileoNav entwickelt, die eine Bestimmung von signalspezifischen Qualitäts-kenngrößen in Echtzeit unterstützen (siehe u.a. [Engler-2004], [Hirle-2006], [Engler-2006]). Die Bestimmung von Qualitätskenngrößen in Echtzeit ist eine Grundlage dafür, um weiterführend auch eine Bewertung der durch das GBAS-System bereitgestellten Ergänzungssignale und eine Überwachung der Leistungsfähigkeit GNSS/GBAS-basierter Ortung zu erreichen.
- Bei beiden vorhergehenden Aufgaben wurden Expertisen über GNSS-Empfangstechnik und ihre Eigenschaften gesammelt sowie Servicemodule (u.a. Dekoder) entwickelt, die den Aufwand an notwendigen Schnittstellenentwicklungen bei der geplanten GBAS-Entwicklung deutlich reduzierten.

### 3 Internationaler Stand zum Projektbeginn

Die Entwicklung differentieller Verfahren wurde zu Beginn der 90-er Jahre insbesondere durch die zivile Nutzergemeinschaft von GPS forciert, um Genauigkeitsverluste bei der einfrequenzbasierten GPS-Positionsbestimmung geeignet zu reduzieren. Fehler mit hoher räumlicher Korrelation (Ionosphäre, Troposphäre, Orbit) als auch die Auswirkung der künstlichen Verschlechterung durch den GPS-Systembetreiber (S/A – Selective Availability) werden dazu an bekannten Messstandorten bestimmt und als Korrekturgrößen an die Nutzer im Umfeld der Referenzstation weitergeleitet. Entsprechend spezifischer Nutzeranforderungen entstanden daraus unterschiedliche Entwicklungslinien, die zu verschiedenen operationellen Diensten führten. Im maritimen Bereich gehören dazu u.a. das DGPS-Netzwerk der U.S. Coast Guard (siehe Abb. 3-1) und das IALA Beacon DGNSS Netzwerk.

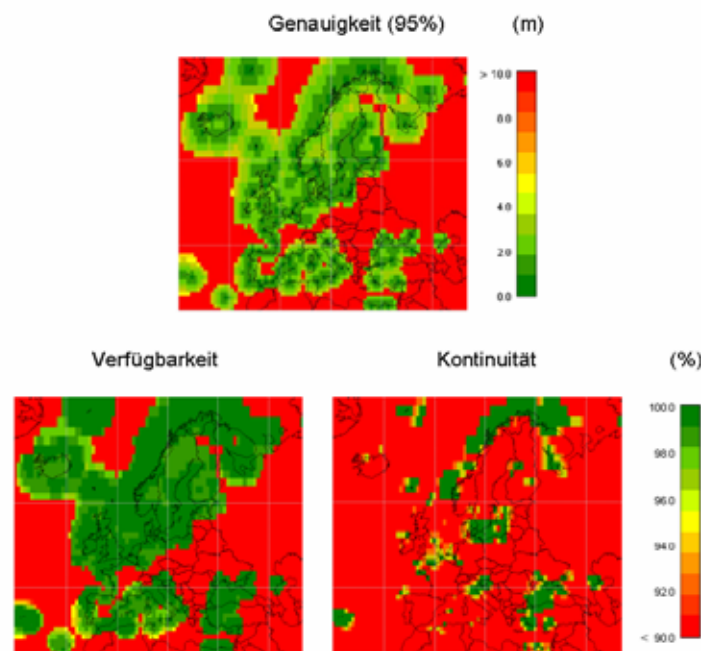


**Abb. 3-1 DGPS-Netzwerk der USA (Maritimes Netzwerk – rote Stationen, [Coast Guard-2008])**

Die mit dem IALA Beacon DGNSS Netzwerk in Europäischen maritimen Gebiet (EMA) erreichbare Genauigkeit wurde in [Christansen-2005] abgeschätzt und entspricht den Darstellungen in Abb. 3-2.

Daraus kann abgeleitet werden, dass die für Ozean- und Küstenbereiche gestellten IMO-Anforderungen in Bezug auf Genauigkeit und Verfügbarkeit (siehe Tab. 1-1) zumindest für den europäischen Raum (simuliertes Nominalverhalten) erreichbar sind. Deutliche Defizite sind bzgl. der zu gewährleistenden Kontinuität zu erkennen. Als Gründe dafür werden einerseits die begrenzte Anzahl von GPS-Satelliten und andererseits die durch die zu diesem Zeitpunkt durch die IALA vorgegebene Kontinuitätsdefinition genannt. In dieser Publikation wird auch abgeschätzt, dass zukünftig bei alleiniger Nutzung von GALILEO die geforderten Leistungskenngößen im Ozean- und Küstenbereich auch erreicht werden könnten, wenn die Positionsbestimmung auf der Grundlage von Zweifrequenzmessungen erfolgt. Für Genauigkeiten besser 1 m werden jedoch nach wie vor Ergänzungssysteme als notwendig erachtet. Demzufolge wurde die Entwicklung und Validierung von lokalen

Ergänzungssystemen, die gleichzeitig eine hohe Präzision und Zuverlässigkeit von GPS- und GALILEO-basierter Ortung ermöglichen, als eine notwendige FuE-Aktivität nicht nur im Rahmen des Projektes ALEGRO identifiziert. Diese Aktivitäten orientieren sich einerseits an spezifischen Anwendungen (Luftfahrt: Übergang von CAT I zu CAT III, Maritim: Erneuerung IALA DGNSS Dienste unter Beachtung IMO-Anforderungen), an der Ausnutzung des technologischen Mehrwerts weiterentwickelter oder zukünftiger Satellitennavigationssysteme wie GPS 3 und GALILEO und an der Vorbereitung ihrer wirtschaftlichen Verwertung in Form von Endgeräten und Diensten.



**Abb. 3-2 95%-Genauigkeit von DGNSS-basierter Ortung in Europa mit dem IALA Beacon System (Quelle: [Christansen-2005]) sowie Verfügbarkeit und Kontinuität für eine 10 m Genauigkeit und einen 25 m Alarmschwellwert**

Für den maritimen Bereich relevante Projekte, die im europäischen Rahmen durchgeführt wurden, sind in Tab. 3-1 aufgelistet. Sie verdeutlichen, dass verschiedene, technologische Lösungsansätze (SBAS und GBAS mit verschiedenen Methoden) verfolgt werden, die effektiv zu einer Steigerung der Genauigkeit und zur Gewährleistung der Integrität beitragen können.

Wenn jedoch Submetergenauigkeiten gefordert sind, so werden in [IALA-R-135] nur Ergänzungssysteme, die auf Pseudolites basieren oder RTK-Verfahren verwenden, als geeignete Lösungsansätze eingestuft. Das war ein Grund dafür, die Projekte SEA GATE (Pseudolites) und ALEGRO (RTK) im Rahmen des Forschungshafens zu initiieren. Die in [IALA-R-135] vorgenommene Bewertung des Integritäts- und Kontinuitätspotenzials beider Lösungsansätze, die methodisch und quantitativ in diesem Dokument nicht nachvollziehbar dargelegt ist, offenbart darüber hinaus den zu Projektbeginn bestehenden FuE-Bedarf, beide Technologien für den maritimen Einsatz zu qualifizieren und im Anwendungsbezug experimentell zu erproben.

**Tab. 3-1 Europäische Projekte mit SBAS/GBAS-Bezug im maritimen Kontext**

Projekt	Förderer Laufzeit	Kurzbeschreibung
<b>MARLET</b>	ESA 2001-2002	Errichtung des LOPS EGNOS Testbed im Hafen Hamburg und Nachweis des mit EGNOS erzielten Mehrwerts für die Schiffsnavigation und in Bezug auf zugeordnete Erweiterungen der AIS-Technik
<b>GALEWAT</b>	ESA ARTES 5 2003-2006	Integration von EGNOS/(AIS-basierter Navigationstechnik in das River Information System und Leistungsnachweis durch Kurzzeitexperimente in den Häfen Lissabon, Wien und Constanza.
<b>MARGAL</b>	EU/GJU 6. FP 2004-2006	Entwicklung und experimentelle Verifikation von lokalen GPS/EGNOS/AIS-basierten Diensten und Nachweis deren Leistungsfähigkeit in den Häfen Harwich und Budapest.
<b>MARUSE</b>	EU/GJU, 6. FP 2005-2007	Entwicklung GALILEO-basierter Schlüsseltechnologien für den maritimen Anwendungsbereich (u.a. Pseudolites, GALILEO/GNSS-basierter Empfänger, maritime User Terminals, Lokale Elemente) und experimentelle Verifikationen in den verschiedenen Testgebieten

Besonderes Augenmerk bei ALEGRO ist dabei auf bestehende und zukünftig mit GALILEO anwendbare Algorithmen- und Verfahrensoptionen zu legen, die sich aus der alleinigen Nutzung von GALILEO und der kombinierten Nutzung mit GPS sowie aus dem Übergang von der einfrequenzbasierten zur mehrfrequenzbasierten Signalverarbeitung ergeben.

**Tab. 3-2 IALA Bewertung von DGNSS-Lösungsansätzen (X – abhängig von der Implementierungsart)**

System	Accuracy	Coverage	Integrity/Continuity
IALA DGNSS	1-3 m	local/regional	Yes/High
SBAS	1-3 m	regional/global	Yes/High
AIS <sup>1</sup>	1-3 m	local	X/Moderate
Pseudolites	sub-meter	local	Yes/Moderate
Eurofix	1-3 m <sup>2</sup>	regional	Yes/High
RTK	sub-meter	local	X/Low

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die wesentlichen Unterschiede der mit ALEGRO verfolgten Aufgabenstellung im Vergleich zu bestehenden maritimen Technologien sich aus Folgendem ergibt:

- Mit GALILEO werden erstmals Signale in mehreren Frequenzbändern mit robusteren Signalstrukturen zur Verfügung stehen, die auch Integritätsinformationen das Satellitennavigationssystem selbst betreffend an den Nutzer in Echtzeit bereitstellen. Dies impliziert eine Erneuerung der Gerätetechnik und von Diensten, für die vor ihrer Nutzung eine experimentelle Erprobung und Zulassung erforderlich wird.
- RTK selbst ist ein im geodätischen Bereich bereits angewendetes Verfahren (z.B. SAPOS, ascos), das mit GPS-Zweifrequenzmessungen Genauigkeiten im dm-Bereich ermöglicht. Die Entwicklung von GALILEO-basierten Differentialverfahren ist ein logischer Folgeschritt, der sich aus der GNSS-Erneuerung selbst ergibt. Ein weiterer beinhaltet die experimentelle Bewertung von RTK-Verfahren im maritimen Anwendungsumfeld und ihre Qualifizierung in Bezug auf bestehende IMO-Anforderungen. Mit beiden Entwicklungsschritten wird die Grundlage geschaffen, um mittelfristig auch erhöhte

Nutzranforderungen an GNSS-basierte Ortung im Hafenumfeld durch den Einsatz von Ergänzungssystemen bedienen zu können.

- Für eine weltweite Vermarktung der angestrebten FuE-Lösungen im Bereich lokaler Ergänzungssysteme sind jedoch zwei, über das Projekt hinausgehende Aufgabenstellungen zu erfüllen. Mit der zeitlichen Verschiebung der operativen Inbetriebnahme von GALILEO können der endgültige Leistungsnachweis von lokalen Ergänzungssystemen und damit ihre Zulassung erst ca. 2013 erfolgen. Unter Beachtung von [IALA-R-135] ist es darüber hinaus erforderlich, dass die RTK-Verfahren wie auch der Einsatz von Pseudolites als maritimer Standard akzeptiert und zugeordnet auch spezifiziert werden. Dies betrifft auch weiterführend noch nicht spezifizierte Servicefunktionalitäten von GBAS, die als Subkomponenten von LBAS oder VTMS eingesetzt werden.

## **4 Beschreibung durchgeführter Arbeiten**

### **4.1 Einordnung der Arbeiten in die Gesamtaufgabenstellung**

Zum Projektbeginn wurde eine mehrtägige Messkampagne im Hafen Rostock durchgeführt. Ziel dieser Messkampagne war einerseits die Gewinnung von Rohdaten im realen Anwendungsbezug als Grundlage für Softwareentwicklungen und deren Validierung (siehe Kapitel 4.4 und 4.5.3). Andererseits bildeten sie die datentechnische Grundlage, um umfassende, experimentell basierte Voruntersuchungen (siehe Kapitel 4.2) vornehmen zu können, die Rückschluss auf die Datenqualität im Hafen Rostock und die Leistungsfähigkeit verschiedener GNSS-Technologien sowie die Identifikation wesentlicher Störgrößen ermöglichten. Die Messkampagne wurde weitestgehend unter Einsatz DLR-eigener Technik durchgeführt, wobei als GNSS-Nutzer das Forschungsschiff „Prof. A.Penck“ des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) fungierte und die Referenzstation am Pier 1 temporär aufgebaut wurde.

Für die Validierung der Positionsergebnisse war es erforderlich, die „wahre“ Antennenposition der GNSS-Sensorik an Bord des sich bewegenden Schiffes mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Das dafür genutzte Verfahren, das in Kapitel 4.2.1 beschrieben und bezüglich seiner Leistungsfähigkeit anhand von Fallbeispielen bewertet wird, beruht auf der Postprozessierung der an der Referenzstation und den Nutzerempfängern gewonnenen Rohdaten. Das Verfahren wurde auch genutzt, um die während der Projektlaufzeit genutzten Standorte der Referenzstation zu bestimmen. Wesentliche Analyseergebnisse der experimentellen Voruntersuchungen sind in Kapitel 4.2.2 dargestellt und sind als Zusammenfassung der technischen Berichte TN-P 1 bis TN-P 5 zu verstehen. Sie bildeten auch eine Grundlage, um den im Projekt geplanten Entwicklungsbedarf detaillierter zu identifizieren.

Eine wesentlicher Projekteinhalt war der hardware- und softwaretechnische Aufbau des experimentellen Ground Based Augmentation System (GBAS) im Hafen Rostock.

Basierend auf einem erarbeiteten Architekturentwurf für das GBAS-Bodensegment und das GBAS-Nutzersegment (Kap. 4.3.1), der sich aus System- und Nutzungsanforderungen ableitete, erfolgte die Komponentenbeschaffung und ihre Integration in das Experimentalsystem (Kap. 4.3.2). Der EVnet-basierte Systemaufbau für das experimentelle GBAS wird im Kapitel 4.3.3 anhand von Blockschaltbildern beschrieben. Der dafür notwendige Bedarf an Anpassungsarbeiten in Form von Änderungen der Betriebssoftware, der Bereitstellung neuer Schnittstellen, der Implementierung von Steuerungsfunktionalitäten und der Entwicklung von zusätzlichen Serviceobjekten werden begründet und erläutert.

Für den Aufbau der Referenzstation des experimentellen GBAS musste ein geeigneter Standort im Hafen Rostock identifiziert werden, wobei ein Kompromiss zwischen nutzbaren (Gebäudeinfrastruktur im Hafen) Standorten und ihrer Eignung (umgebungsbedingtes Störpotenzial) gefunden werden musste (siehe 4.3.4).

Ein wesentlicher FuE-Entwicklungsschwerpunkt des Projekts ALEGRO bestand im softwaretechnischen Ausbau des GBAS-Bodensegments. Integrale Entwicklungsarbeiten in diesem Rahmen waren die Erstellung des Softwarearchitekturdesigns (Kap. 4.4.1), die Entwicklung eines geeigneten Betriebssteuerungs- und -überwachungskonzeptes (Kap.4.4.3), die Algorithmen- und Softwareentwicklung für die Umsetzung der vorgesehenen Datenprozessierungstufen (datenspezifische Rohdatenvorverarbeitung im Kap. 4.4.4), satellitensignalspezifische Bereitstellung von Korrekturgrößen und Ableitung von Qualitätskenngrößen im Kap. 4.4.5, die Ableitung stationsspezifische Qualitätskenngrößen

im Kap.4.4.6 sowie die Bereitstellung Graphischer User Interfaces zur Darstellung wesentlicher Status- und Qualitätskenngrößen in Echtzeit (siehe Kap. 4.4.7).

Die Bereitstellung von Funktionalitäten, die eine Leistungsbewertung des operativ nutzbaren GNSS anhand empfangener Signale und abgeleiteter Daten ermöglichen, ist eine notwendige Grundlage, um die mit ALEGRO verfolgte Qualifizierung von phasenbasierten Differentialverfahren für maritime „Safety of Life“ Anwendungen stufenweise umzusetzen. Für die dafür notwendige Integritätsüberwachung, die letztlich eine Eigenbewertung der momentan erreichbaren Positionsgenauigkeit in Bezug auf spezifizierte Nutzeranforderungen darstellt, ist es einerseits notwendig, den Soll-Ist-Vergleich begründet durchzuführen. Andererseits ergibt sich das Potenzial, durch eine situationsbezogene Auswahl und Korrektur von für die Positionsbestimmung zu verwendeten Satelliten- und Korrektursignalen eine genauere, robustere und auch verlässlichere Ergebnisbereitstellung zu erreichen. Im Gegensatz zur Luftfahrt, wo der Spielraum dafür einsetzbarer Verfahren durch den fortgeschrittenen Standardisierungsprozess zumindest bei CAT I bereits eingeschränkt ist, ist im Seefahrtsbereich bisher lediglich das für IALA Beacon DGNSS umzusetzende Integritätskonzept (siehe Anlage A) spezifiziert. Bereits eine direkte Adaption dieses eher pragmatischen Integritätskonzeptes auf Pseudolite- oder RTK-basiertes GBAS erfordert weiterführende Untersuchungen und experimentelle Validierungen, um z.B. verfahrensspezifische Wertebereichsdefinitionen ([IALA-R-121]) auch für RTK-Verfahren geeignet und möglichst automatisiert bereitzustellen. Alternativ ist damit auch der Entwicklungsspielraum gegeben, innovative Verfahrenansätze zur Integritätsbewertung zukünftig zu entwickeln und zu validieren, die sich aus einer situationsbasierten Verfahrenssteuerung und aus der Verwendung von routinemäßig bestimmten Soll-Qualitätskenngrößen ergeben. Um dieses Entwicklungspotenzial nicht frühzeitig aufzugeben, wurde das experimentelle GBAS-System mit einem vorläufigen Integritätsmonitoring angelehnt an das IALA DGNSS Integritätskonzept ausgestattet. Jedoch ermöglichen die Nutzung der EVnet-Plattform und der modulare, hierarchische SW-Aufbau jederzeit eine Weiterentwicklung entsprechend dem Wissensstand und zukünftiger Standards in diesem Bereich.

Ein weiterer FuE-Schwerpunkt im Projekt ALEGRO bestand in der Entwicklung und im Aufbau eines GBAS-Nutzersegments (Kap. 4.5), das zur Validierung und Demonstration der Leistungsfähigkeit GBAS-basierter Positionsbestimmung geeignet ist. In den zugeordneten Unterkapiteln (Kap. 4.5.1 bis 4.5.3) werden die Architektur des Nutzersegments, dafür beschaffte HW-Komponenten und zugeordnete Algorithmen- und Softwareentwicklungen zusammenfassend dargestellt.

Obwohl eine umfassende Validierung der Leistungsfähigkeit des ALEGRO GBAS in einem länger andauernden Testbetrieb und von Erprobungen in verschiedenen Anwendungsbezügen wünschenswert gewesen wäre, konnten diese aus Zeitgründen (kostenneutrale Laufzeitverlängerung nicht möglich) nicht in der angestrebten Art und Weise umgesetzt werden. Der mit dem Folgeprojekt ASMS unterstützte und durch das DLR geplante Testbetrieb des ALEGRO GBAS wird aber als notwendige Grundlage gesehen, um umfassendere Validierungsergebnisse bereitstellen zu können.



## **4.2 Experimentelle Voruntersuchungen**

Experimentelle Voruntersuchungen dienen zur Validierung verschiedener, derzeit praktizierter Verfahren für eine GNSS-basierte Positionsbestimmung (stand alone, EGNOS, RTK). Neben der Bewertung der erreichbaren Genauigkeit wurde besonderes Augenmerk auf das Verhalten von Fehlereinflüssen im maritimen Anwendungsumfeld gelegt.

### **4.2.1 Validierungsmethodik**

Um die Genauigkeit der verschiedenen Positionierungsverfahren bestimmen zu können, ist es erforderlich, über möglichst präzise Referenzmesspunkte und im Fall von bewegten Nutzern über Referenztrajektorien zu verfügen. Dabei gilt zu beachten, dass einerseits ein eingesetztes Verfahren zur Referenztrajektorienbestimmung selbst Genauigkeitsschwankungen unterliegen wird. Andererseits muss der Fehler der bestimmten Referenztrajektorien unter dem erwarteten des Echtzeitverfahrens liegen, um überhaupt eine sinnvolle Bewertung vornehmen zu können.

Die Referenzpunkte (Einmessen Referenzstation, statische Messpunkte) und Referenztrajektorien (Testfahrten mit Forschungsschiff „Prof. A. Penck“ und DLR-eigenen Messwagen) wurden durch Postprozessierung der GNSS-Daten ermittelt. Dafür wurden die Daten einer Referenzstation (IGS-Station „Warnemünde“ oder ALEGRO Referenzstation) und die Daten der mobil eingesetzten Empfänger durch die Software TTC (Trimble Total Control) als Nachfolger der Geogenius-Software gemeinsam prozessiert. Im Fall von statischen Messpunkten wurde der TTC-Statikprozessor und von Trajektorien der kinematische TTC-Prozessor genutzt. Bereits erste Analyseergebnisse belegten die Erwartung, dass die Postprozessierungsergebnisse selbst von der Qualität der GNSS-Daten mitbestimmt werden. Dies spiegelt sich insbesondere in den von TTC selbst bereitgestellten Qualitätskenngrößen wie den RMS-Fehler (Root Mean Square) wieder. Eine mehrmalige und auch partiell mehrstufige Postprozessierung wurde notwendig, um anhand von identifizierten Ausreißern und Anomalitäten in den Ergebnissen durch Änderung der Filtermethoden oder durch zeitweise Inaktivierung störender Satelliten ein physikalisch plausibles Ergebnis mit reduziertem RMS zu erreichen.

### **ANFORDERUNGEN**

Wie bereits erwähnt, sollte die Genauigkeit von bereitgestellten Referenztrajektorien deutlich über der Genauigkeit der zu validierenden Echtzeitverfahren liegen. Werden nur die Signale operativ verfügbarer Satellitennavigationssysteme genutzt, so sind im ungestörten Fall Positionsgenauigkeiten im Bereich mehrerer Meter und im gestörten Fall von bis zu einigen 100 m denkbar. Werden zusätzlich die Ergänzungsinformationen von EGNOS genutzt, so sollten entsprechend der Systemspezifikation der Positionsfehler unter 10 m liegen. Für phasenbasierte Differentialverfahren (RTK, Real Time Kinematic) werden zumindest für statische Messungen Genauigkeiten im Subdezimeterbereich offeriert. Daraus resultiert, dass die Referenztrajektorien mit einer Genauigkeit von maximal 1 bis 2 Zentimetern bereitgestellt werden müssen.

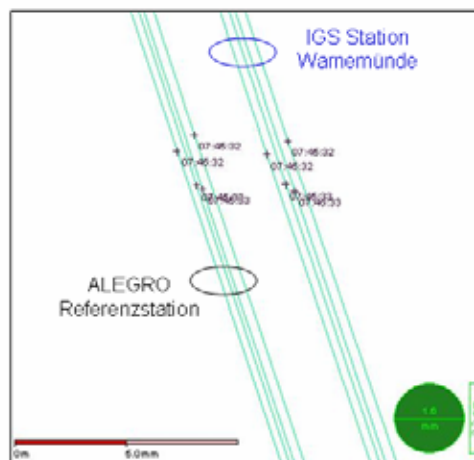
### **LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER TTC-SOFTWARE**

Erste statische Testanalysen mit Messungen auf dem DLR-Gelände (Zeitraum 12.01.2007 bis 23.01.2007) und in unmittelbarer Umgebung führten zu folgenden Ergebnissen:

- Bei einer Bestimmung von Referenzpunkten auf dem Ost- und Westdach des DLR-IKN-Gebäudes (Basislänge < 30 m) in Bezug auf den bekannten Standort der DLR-Station NTZ1 wird die Genauigkeit der Referenzpunkte durch den TTC-Statikprozessor mit einem RMS von weniger als 1 cm angegeben.

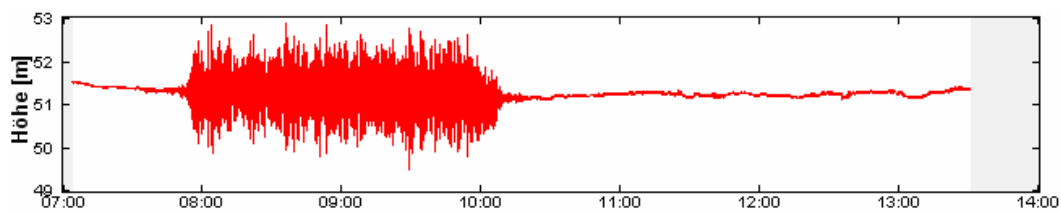
- Eine Berechnung mit dem TTC-Kinematikprozessor zeigte jedoch, dass bei den Messfahrten, die durch Wald als auch auf Alleen durchgeführt wurden, nur bei 20% der Messpunkte eine Mehrdeutigkeitsfixierung erfolgte. Dabei wurde durch TTC bei diesen Positionen die Genauigkeit mit einem RMS von 2 cm spezifiziert.
- Zwischen den mit TTC bestimmten Referenztrajektorien und Echtzeitergebnissen, die durch den RTK-Standardempfänger im NMEA-Datenformat bei dynamischen Messungen bereitgestellt wurden, konnte ein mittlerer Offset in den Koordinaten identifiziert werden. Die Größe der Differenzen 0.2m (X) bis 1.5m (Y) wurden an Haltepunkten mittels TTC Statikprozessor bestätigt. Als Ursache dafür wurde die ungenügende Genauigkeit der zu diesem Zeitpunkt vom Referenzempfänger ermittelte und verwendete Referenzposition identifiziert.

Während der Initialmesskampagne von ALEGRO vom 25.1. bis 2.2.2007 wurden auf der mobilen Nutzerplattform (Forschungsschiff „Prof. A. Penck“) 4 Empfänger parallel an der gleichen Antenne betrieben. Das erlaubte auch umfangreichere Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der TTC-Postprozessierung, die in [TN-P 2] ausführlich dargelegt sind. Die Messdaten der über eine Antenne betriebenen 4 Empfänger (Kurzbezeichnung: GDLR, GNSS, GRTK und GGEG) wurden unter Verwendung der Referenzstationsdaten (GBAS) unabhängig voneinander durch TTC prozessiert. Das ermöglichte die Bestimmung der Relativgenauigkeit und seine Bewertung in Hinblick auf die durch TTC bereitgestellten RMS-Werte. Diese Vergleichsmessungen belegten, dass die Relativgenauigkeiten bei allen Messfahrten im Bereich von maximal einigen Millimeter lagen (siehe Abb. 4-1). Werden unterschiedliche Referenzstationen genutzt, so ergibt sich ein zusätzliches Offset von einigen Millimetern, das sich aus der Genauigkeit der Referenzstationsdaten und dem Datum seiner Bestimmung erklären lässt.



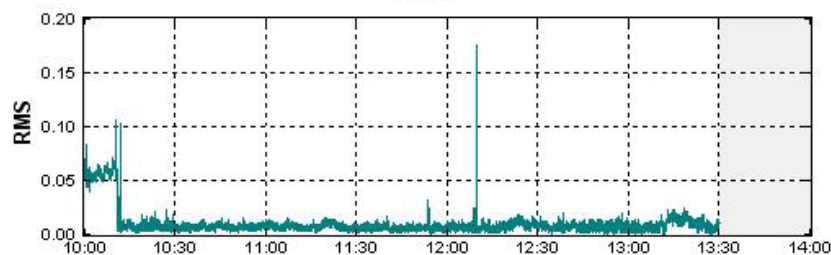
**Abb. 4-1 Referenztrajektorien unabhängig ermittelt für die 4 mobilen Empfänger an Bord der „Prof. A. Penck“ mit Hilfe der Daten der Referenzstationen (IGS Warnemünde, ALEGRO Referenzstation) am 2.2.2007 um 7:45:33 Uhr**

Obwohl die Höhenbestimmung für die Schiffsnavigation nicht im primären Interesse liegt, sind die Messbedingungen (Windstärke 8 und erhöhter Wellengang am 31.01.2008 auf der Ostsee) mit in die Analysen einzubeziehen (siehe Abb. 4-2).



**Abb. 4-2 Darstellung der mit TTC berechneten Höhenwerte vom Schiff für den 31.1.2007**

Im Zeitraum von ca. 8 bis 10 Uhr kreuzte das Forschungsschiff auf der Ostsee und war der rauen See ausgesetzt. Dies spiegelt sich eindeutig in dem mit TTC bestimmten Höhenprofil wieder, das Variationen im Bereich von bis zu 2 m aufweist. Unter anderem bei solchen Bedingungen gelingt es auch der kinematischen TTC-Prozessierung nicht immer, die Mehrdeutigkeiten für eine trägerphasenbasierte Positionsbestimmung aufzulösen. Erfolgt bei gestörten Messungen eine falsche Auflösung der Mehrdeutigkeit, so kann dieser falsche Wert für einen längeren Zeitraum von durchaus bis zu 30 Minuten in der TTC-Prozessierung verwendet werden. Im Idealfall sind solche Effekte aus den durch TTC bereitgestellten RMS-Werten ablesbar. So zeigt sich z.B. in den RMS-Werten vom 30.01.2007 ab 10 Uhr ein erhöhtes RMS von 5 cm (siehe Abb. 4-3).



**Abb. 4-3 RMS-Werte (in Meter) für GDLR-Trajektorienbestimmung mit der ALGERO Referenzstation (30.1.2007)**

Aber auch die Ausreißer der RMS-Werte um 12:00 Uhr sind als ein weiteres Indiz dafür einzustufen, dass die gewünschte Genauigkeiten der Referenztrajektorien von einigen Zentimetern nicht bei Verwendung dieses Verfahrens jederzeit gewährleistet werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Mit der TTC-basierten Postprozessierung können Referenztrajektorien mit einer Genauigkeit im Subdezimeterbereich meistens bereitgestellt werden. Deutlich erhöhte RMS-Werte als auch Ausreißer in den postprozessierten Daten sind mit einer eingeschränkten Genauigkeit der Referenztrajektorie gleichzusetzen, so dass das Validierungspotenzial von Echtzeitergebnissen zumindest in Bezug auf phasenbasierte Differentialverfahren eingeschränkt ist. Mittlere Offsets, die zwischen verschiedenen Postprozessierungsergebnissen beobachtet werden konnten, resultieren aus der bereitgestellten Referenzposition, dem Datum ihrer Bestimmung und dem dafür verwendeten Koordinatensystem. Um diese Problematik endgültig ausräumen zu können, sind weiterführende Analysen und auch eine Neubestimmung aller geodätischen Referenzpunkte im Hafen Rostock notwendig.

### **4.2.2 Leistungsfähigkeit phasenbasiertes, differentielles GPS**

Bereits heute gibt es kommerziell verfügbare Systeme, die eine differentielle, phasenbasierte Positionsbestimmung ermöglichen. Die eingesetzten Verfahren, die auch als Real Time Kinematik (RTK) bezeichnet werden, beruhen auf der Nutzung einer oder mehrerer Referenzstationen. Bereits heute werden RTK-Verfahren im Hafenbereich, jedoch primär für vermessungstechnische Aufgabenstellungen z.B. in Verbindung mit dem SAPOS-Dienst eingesetzt. Als Beispiel seien hier die RTK-Hauptanwendungsgebiete bei der HPA (Hamburg Port Authority) aufgeführt [Brunkhorst-2006]:

- Einzelpunktmessungen für z.B. topografische Aufmaße oder Massenermittlungen,
- Rasteraufmaße, auch im motorisierten Modus,
- Standpunktbestimmungen für GPS-Tachymetrie,
- Bauwerksüberwachungen (Brücken, Schleusen, Kaimauern usw.),
- Lage-Absteckungsaufgaben aller Art (vom Bohrpunkt bis zum Bordstein),
- Positionsbestimmung für die Peilschiffe (nautischer Einsatz).

Ziel der Initialmesskampagne war die experimentelle Erprobung dieser Technologie, um darauf aufbauend

- durch eine umfassende Datenanalyse Aussagen über die Genauigkeit und Verfügbarkeit RTK-basierter Positionslösungen bei ihrer Nutzung zur Schiffsnavigation ableiten zu können,
- limitierende Faktoren in Bezug auf die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit RTK-basierter Navigationslösungen identifizieren zu können
- über eine geeignete Datenbasis zu verfügen, auf deren Grundlage die im Projekt geplante Algorithmen- und Verfahrensentwicklung erfolgen kann.

Limitierende Faktoren für die Genauigkeit und Verfügbarkeit von phasenbasierten DGNSS-Positionslösungen sind, wie bei allen Anwendungen der Satellitennavigation, lokale und atmosphärisch bedingte Ausbreitungseffekte (Ionosphäre, Troposphäre, Mehrwegeausbreitung, Interferenzen, Jamming) bzw. die vollkommene Abschattung von Signalen. Bei RTK-Verfahren sind weiterführend der zeitnahe Empfang von Korrektur- bzw. Beobachtungsdaten, die durch eine Referenzstation oder einen Service bereitgestellt werden, erforderlich, um überhaupt eine differentielle, phasenbasierte Positionslösung vornehmen zu können. Diese Korrektur- bzw. Beobachtungsdaten müssen im gesamten Einsatzgebiet empfangbar sein. Folglich muss die Verfügbarkeit der Kommunikation zwischen Referenzstation und Nutzer sowohl in Genauigkeits- als auch in zukünftige Integritäts- bzw. Kontinuitätsbetrachtungen mit einbezogen werden.

Im Zeitraum vom 29.01.2007 bis zum 02.02.2007 wurde eine mehrtägige Messkampagne im Hafengebiet von Rostock durchgeführt, die im Folgenden anhand der Zielsetzung, der technische Durchführung und abgeleiteter Ergebnisse zusammenfassend dargestellt wird. Eine ausführlichere Beschreibung aller Details und Ergebnisse findet sich in den technischen Berichten zu dieser Messkampagne: [TN-P 1], [TN-P 2], [TN-P 3], [TN-P 4] und [TN-P 5].

#### **4.2.2.1 Zielsetzungen der Initialmesskampagne**

Die übergeordnete Zielstellung dieser ersten Messkampagne war die Gewinnung von GNSS-Daten und Datenprodukten (Rohdaten, Position, DOP, etc.), die unter realen, maritimen Anwendungsbedingungen in Echtzeit gemessen bzw. abgeleitet wurden.

Die Analyse der Daten erfolgte auf 3 Ebenen, denen folgende, inhaltliche Zielstellungen zugeordnet waren:

**ROHDATENANALYSE [TN-P 5]**

Eine Bewertung der Rohdatenqualität und –Verfügbarkeit von Navigationssignalen ist erforderlich, um das Auftreten und die Größe einzelner Fehleranteile in den GNSS-Messgrößen bewerten zu können. Dieser Analyse wurden die Daten der Referenzstation und der vier auf dem Forschungsschiff installierten Empfängern unterzogen.

Rohdaten sind hier die Code- und Trägerphasenmessungen der empfangenen GPS- und GLONASS-Signale sowie die Signalqualität beschreibende Größen wie die Amplituden oder der Signal-Rausch-Abstand. Die Qualität von Trägerphasenmessungen wird durch das Phasenrauschen und das Auftreten von Phasensprüngen (Cycle Slips) beschrieben. Qualitätskenngrößen für Codephasenmessungen sind die Größe des Mehrwegefehlers und das Coderauschen. Abgeleitete Größen sind z.B. der ionosphärenbedingte Laufzeitfehler und seine Rate, die aus der kombinierten Nutzung von Zweifrequenzmessungen bestimmt werden können.

**NMEA-DATENANALYSE [TN-P 4]**

Positions- und Metainformationen, die durch die Empfänger generiert und im NMEA-Datenformat bereitgestellt werden, entsprechen den Messergebnissen, die einem Schiffsführer bereitgestellt werden. Sie sind hinsichtlich ihrer Plausibilität und Vollständigkeit zu überprüfen.

Bei der Plausibilitätsprüfung werden einerseits redundante Informationen in den NMEA-Ausgabefiles auf ihre Konsistenz überprüft und andererseits gemessene mit theoretisch berechneten Werten verglichen. Abweichungen jeglicher Art sind dabei hinsichtlich möglicher Ursachen zu untersuchen.

Bei der Vollständigkeitsprüfung wird geprüft, ob die Ausgabedaten mit der erforderlichen Updaterate bereitgestellt wurden. Eine diskontinuierliche Ergebnisbereitstellung ist ein Indiz für eine instabile Messwertgenerierung und –bereitstellung. Auch hier sind die Ursachen zu identifizieren.

Ferner wurden vergleichende Analysen der NMEA-Informationen der verschiedenen Empfänger durchgeführt, da diese Rückschlüsse auf verfahrensspezifische Besonderheiten bei der Auswahl der für die Positionsbestimmung genutzter Satelliten ermöglichen.

**ANALYSE DER POSITIONSLÖSUNGEN [TN-P 3]**

Für den Anwender von GNSS-basierten Navigationsverfahren sind neben der Verfügbarkeit insbesondere die Genauigkeit und die Verlässlichkeit damit erzielter Positionslösungen von primärem Interesse. Dabei spielt das eingesetzte Verfahren und die Nutzung dafür notwendiger Navigationshilfen eine entscheidende Rolle. Folgende Verfahren wurden im Rahmen der Messkampagne betrachtet:

- Phasenbasiertes, differentielles Verfahren basierend auf Zweifrequenzmessungen an einer Referenzstation und am mobilen Empfänger (Rover)
- Zweifrequenzbasierte „stand alone“ Positionierung unter Nutzung von mit Hilfe der Trägerphasen geglätteten Codephasen
- Einfrequenzbasierte, codephasenbasierte Positionsbestimmung unter Nutzung von EGNOS-Korrekturen

Für eine Genauigkeitsbewertung sind Referenzpositionen bzw. Referenztrajektorien notwendig. Diese wurden, wie im Kap. 4.2.1 beschrieben, durch Postprozessierung der Messdaten mit TTC generiert.

Aus diesen Ergebnissen sollten neben einer statistischen Beschreibung der erzielten Genauigkeiten insbesondere Zeiträume und Zeitpunkte identifiziert werden, bei denen ein erhöhter Positionierungsfehler beobachtet wurde.

#### **4.2.2.2 Messgebiet und eingesetzte Messtechnik**

Das Untersuchungsgebiet der Messkampagne war vor allem auf das rot gekennzeichnete Gebiet ( Abb. 4-4) im Bereich des Hafens Rostock und seines Zulaufs beschränkt.



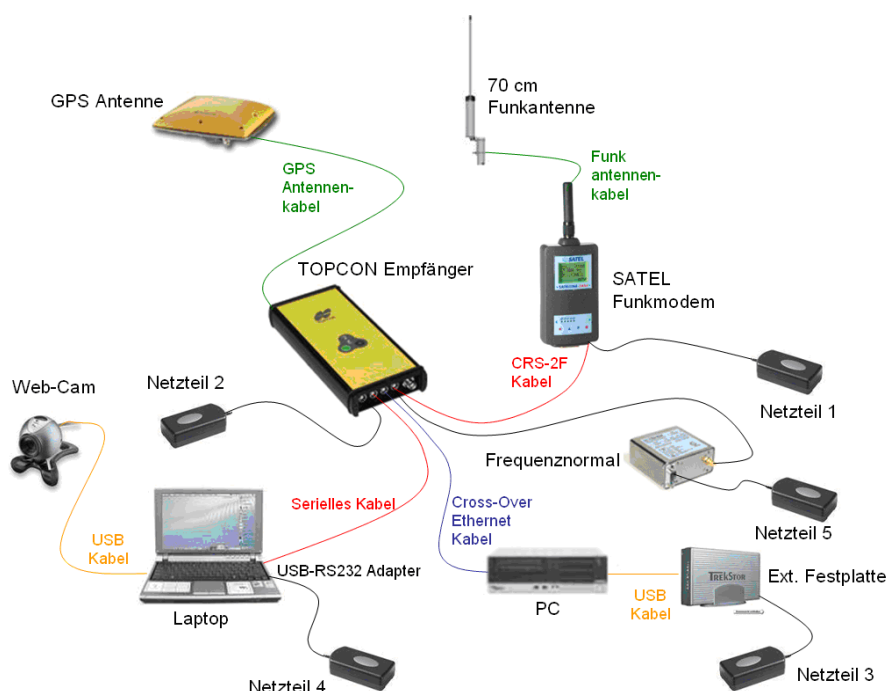
**Abb. 4-4 Untersuchungsgebiete im Rostocker Hafen**

Folgende spezifischen Gebiete wurden dabei mehrfach angelaufen:

- Seekanal (Verengung der Warnow mit Werft am Westufer, s. auch Abb. 4-16,
- Wendepatte (Bereich südlich des „Breitlings“, in dem vorwiegend Wendemanöver der Scandline-Fähren durchgeführt werden),
- Scandline Pier (Anleger der Scandline Fähren),
- Anleger (Bereich mit Hafen-Infrastruktur für den Umschlag verschiedenster Massengüter z.B. Schrott, Holz und Öl).

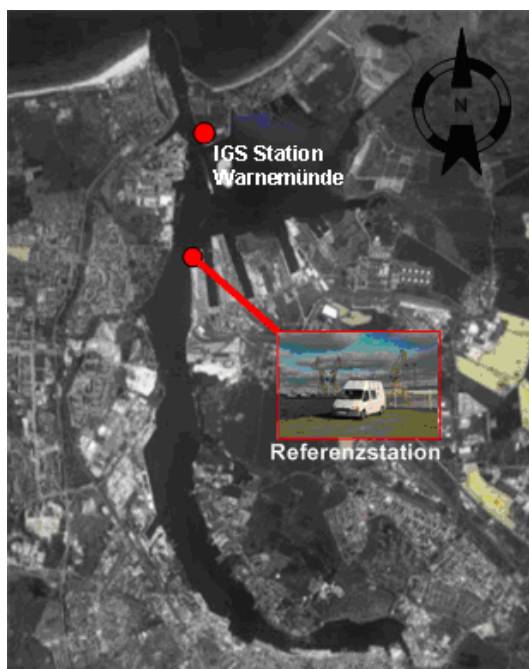
Für die Messkampagne wurde ein Messfahrzeug des DLR als Referenzstation entsprechend Abb. 4-5 eingerüstet.

Eingesetzt wurde ein kombinierter GPS/GLONASS-Empfänger, der mit einer RTK-fähigen Firmware ausgestattet war, und dessen Taktgenerierung durch ein zusätzliches externes Frequenznormal gestützt wurde. Die durch den Empfänger bereitgestellten Ergänzungssignale wurden an einen Sender weitergeleitet, der diese auf 434 MHz mit einer Sendeleistung von 0.5 W abstrahlte.



**Abb. 4-5 Messaufbau der mobilen Referenzstation**

Während der Messkampagne befand sich das Messfahrzeug an der nördlichen Grenze von Pier 1 (Abb. 4-6). Um den Referenzstandort zu bestimmen, erfolgte in Vorbereitung der Messkampagne eine Einmessung.



**Abb. 4-6 Lage der Referenzstation (Messbus) und der IGS-Station (WARN) im Rostocker Hafen.**

Als Messfahrzeug wurde das Forschungsschiff „Prof. Albrecht Penck“ des Instituts für Ostseeforschung in Warnemünde (IOW) eingesetzt (Abb. 4-7).





**Abb. 4-7 Forschungsschiff „Prof. A. Penck“ des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde**

In Abb. 4-9 ist der an Bord des Schiffes vorgenommene Messaufbau dargestellt. Der parallele Betrieb von 4 Empfängern an einer gemeinsamen Antenne sicherte, dass jeder der Empfänger mit der gleichen Anzahl von Eigenmessungen versorgt wurde und dass diesen GNSS-Signalen ein identisches Fehlverhalten in Folge von satellitenspezifischen und ausbreitungsbedingten Effekten zugeordnet werden konnte. Diese Antenne war auf dem Vormast des Forschungsschiffs installiert, um weitestgehend Sichtfreiheit zu garantieren.



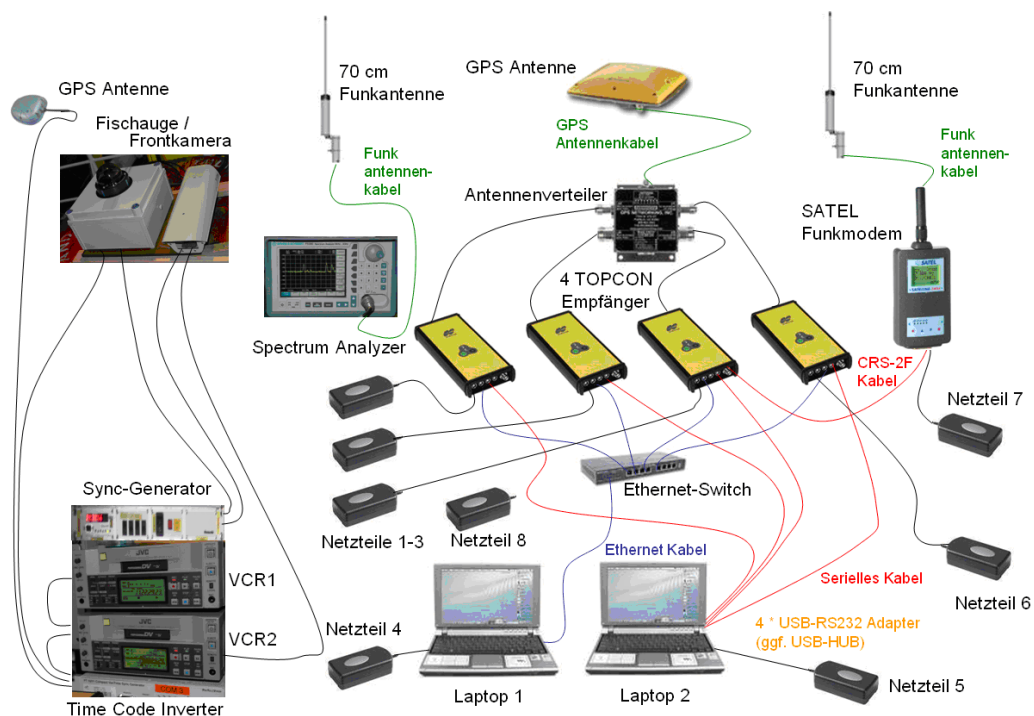
**Abb. 4-8 Antenneninstallation auf Vormast**

Drei der vier auf der „Prof. A. Penck“ eingesetzten Empfänger wurden so konfiguriert, dass jeweils ein anderes Verfahren zur Positionierung verwendet wurde:

1. Positionierung mit Code- u. Trägerphasenmessungen von GPS- und GLONASS,
2. Positionierung mit Codephasenmessungen des GPS in Kombination mit EGNOS,
3. Positionierung unter Einbeziehung der Ergänzungssignale einer lokalen Referenzstation im Hafen von Rostock.

Der vierte Empfänger war mit einer speziellen Firmware ausgestattet, um zusätzlich über Amplitudenmessungen der GNSS-Signale zu verfügen. Der mit phasenbasiertem DGNSS operierende Empfänger war zusätzlich an ein Funkmodem angeschlossen, das den Empfang der Ergänzungssignale der Referenzstation absicherte.





**Abb. 4-9 Messaufbau an Bord des Forschungsschiffes „Prof. A. Penck“**

Zusätzlich zur GNSS-Ausrüstung wurde Videotechnik installiert, die aus einer Front- und einer Fischaugenkamera sowie entsprechender Aufzeichnungs- und Synchronisierungstechnik bestand. Die Kameras wurden unterhalb der GPS-Antenne installiert (Abb. 4-10). Die Videoaufnahmen wurden als notwendiges Hilfsmittel angesehen, um im Rahmen der späteren Auswertung der aufgezeichneten Daten und Signale georeferenzierte Aussagen bzgl. der Umgebungsbedingungen treffen zu können.



**Abb. 4-10 Videosystem**

In Abb. 4-11 ist der Innenaufbau der bordseitigen Messtechnik dargestellt. Mit dem eingesetzten Spektralanalysator wurde der Signalempfang des Ergänzungssignals der Referenzstation überwacht.



**Abb. 4-11 Innenaufbau der Messtechnik an Bord des IOW Forschungsschiff "Professor Albrecht Penck"**

Eine umfassende Beschreibung der Messausrüstung und des Messaufbaus ist in [TN-P 1] nachlesbar,

#### **4.2.2.3 Ergebnisübersicht und Beispiele**

Entsprechend dem im Abschnitt 4.2.2.1 bereits beschriebenen Vorgehen bei der Datenauswertung ergaben sich folgende wesentlichen Ergebnisse:

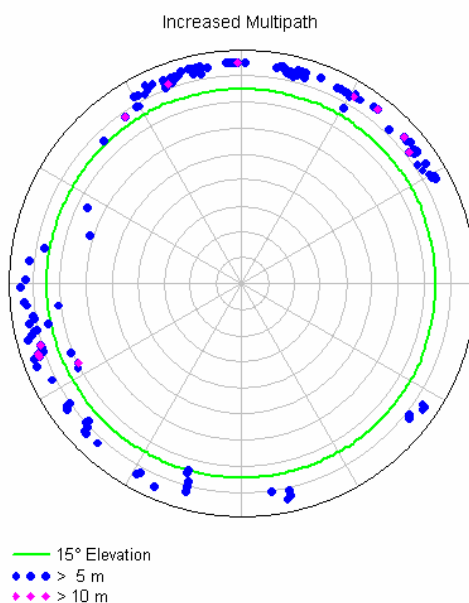
#### **ROHDATENANALYSE**

In den Trägerphasenmessungen der Referenzstation wurde eine ungewöhnlich hohe Anzahl von Phasensprüngen festgestellt. Als primäre Ursache dafür konnten Mehrwegeausbreitungseffekte aus der unmittelbaren Umgebung der Station identifiziert werden, die sich aus dem bewusst gewählten, suboptimalen Standort der Referenzstation begründen lassen. Durch die unmittelbare Nähe zum Scandline-Fährterminal war zu erwarten, dass sich jede Fährbewegung inklusive Anlegemanöver in den Daten widerspiegeln muss. Interessant in diesem Kontext war, dass 90% aller hier detektierten Phasensprünge an der Referenzstation in den GLONASS-Trägerphasen auftraten.

Im Falle der Rover wurden beim GNSS-Empfänger mehr als 50% und beim GRTK-Empfänger mehr als 70% aller Phasensprünge bei den GLONASS-Signalen beobachtet. Da bei den Rovern jedoch die Messungen weniger durch Mehrwegeeffekte esgört wurden, kann daraus abgeleitet werden, dass der GLONASS-Signalempfang wesentlich empfindlicher gegenüber Mehrwegeausbreitungen ist.

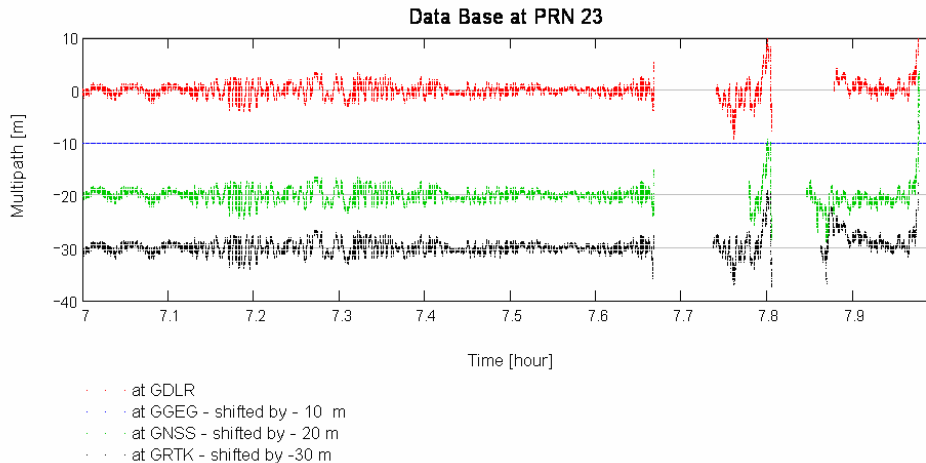
Ferner gilt für die Trägerphasenmesswerte, die an Bord des Schiffes gewonnen wurden, dass ein erhöhtes Auftreten von Phasensprüngen zeitlich den Fahrtanteilen des Schiffes auf der Ostsee zuzuordnen ist. Wie auch aus dem Phasenrauschen ablesbar, handelt es sich hier vorwiegend um detektierte Pseudo-Sprünge, die in Folge des Anstiegs des methodischen Messfehlers bei der Echtzeitbestimmung durch die hohe Empfängerdynamik (Wind, Wellengang, Schiffsvibration) hervorgerufen werden.

Mehrwegefehler an der Referenzstation konnten eindeutig den Umgebungsbedingungen zugeordnet werden und anhand der Bebauung als auch den Fährfahrplan erklärt werden (siehe Abb. 4-12).



**Abb. 4-12 Erhöhte Mehrwegefehler an der Referenzstation zugeordnet zu Elevations- und Azimuthwinkeln des getrackten GNSS-Signals**

Die bei den Schiffsmessungen aufgetretenen Mehrwegefehler waren an fast allen Messtagen nur bei sehr niedrigen Elevationswinkeln größer als 5 m. Eine Ausnahme wurde beim GPS-Satelliten 23 am 01.02.2007 beobachtet.



**Abb. 4-13 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 23) für die C/A-Rangemessungen (01.02.2007)**

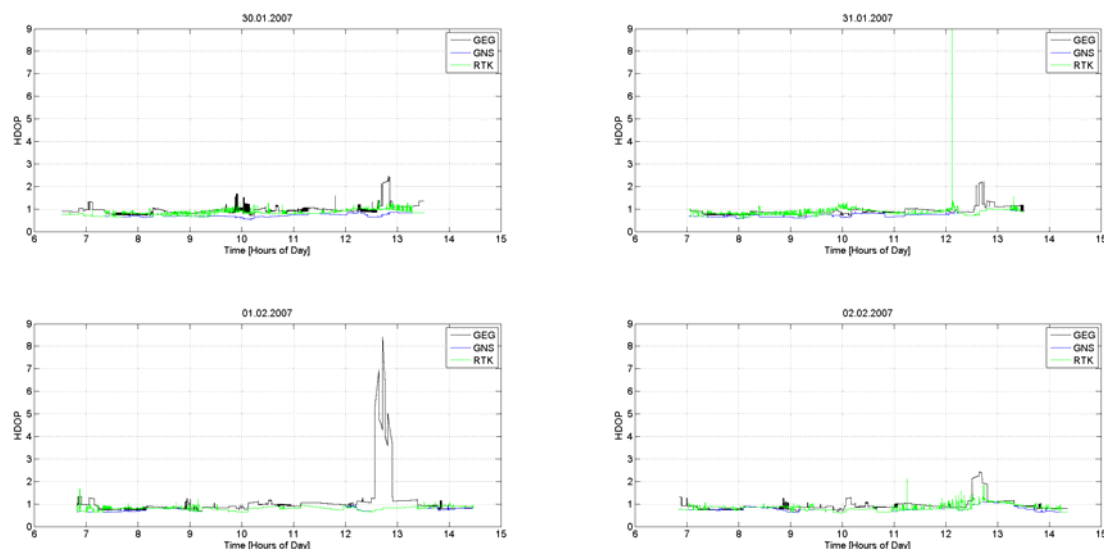
Das Zeitverhalten des Mehrwegefehlers dieses Satelliten ist in Abb. 4-13 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt kreuzte das Forschungsschiff von 7:45 Uhr bis 8:00 Uhr in der Nähe des Werftgeländes, so dass dortige Krananlagen als Ursache für die erhöhte Mehrwegeausbreitung identifiziert werden konnten. Die gesamten Analyseergebnisse sind in [TN-P 5] nachlesbar.

## **NMEA-ANALYSE**

Bezogen auf die erwartete Anzahl von Messzeitpunkten, die durch Messbeginn und Messende sowie die genutzte Samplingfrequenz definiert ist, wurden NMEA-Daten mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% bereitgestellt. Nur mit diesen konnte eine weiterführende Analyse vorgenommen werden. Für verfügbare NMEA-Messages konnte festgestellt werden, dass eine Positionsbestimmung zu 100% erfolgte. Einen Sonderfall in diesem Kontext spielt die phasenbasierte, differentiell bestimmte Positionslösung. Gelingt es dem Empfänger nicht oder nur eingeschränkt, eine differentielle Positionierung vorzunehmen, so sind die Positionsergebnisse „stand alone“ oder „RTK float“ klassifiziert. Nur im Fall von „RTK fixed“ kann von einer erfolgreichen Positionsbestimmung unter Verwendung des phasenbasierten DGNSS-Ansatzes ausgegangen werden. So wird z.B. am 01.02. eine Position bereits in drei von vier Zeitpunkten (75%) nur im „stand alone“-Modus bestimmt. Als wesentliche Ursache dafür konnte die bordseitige Verfügbarkeit der Ergänzungssignale der Referenzstation identifiziert werden.

Für die eingeschränkte Datenverfügbarkeit sind kurzzeitige Ausfälle in den bereitgestellten Daten verantwortlich, die sich bis auf 2 Ausnahmen auf wenige Sekunden beschränkten. Die erwartete Datenverfügbarkeit wurde dafür aus der Sichtbarkeit des Satelliten bezogen auf den Messzeitraum abgeleitet. Die reale Verfügbarkeit bezieht auf verfügbare Messwerte in Form der NMEA-Messages.

Eine zeitliche Korrelation der Datenlücken mit Signalstörungen konnte für GPS-Signale nicht explizit festgestellt werden. Vielmehr sind sie mit numerischen Abweichungen zwischen der Georeferenzierung von Satelliten und der tatsächlichen Sichtbarkeit insbesondere bei Satellitenauf- und -untergängen erklärbar. Größere Abweichungen bei GLONASS-Satelliten wurden insbesondere am 01.02. und 02.02. festgestellt, sind aber durch den zur Verfügung stehenden veralteten Almanach erklärbar.



**Abb. 4-14 HDOP-Werte aller Rover-Empfänger für alle Messtage**

Die an der Referenzstation und auf dem Schiff bestimmten HDOP-Werte waren bis auf wenige Ausnahmen kleiner als 2, die HDOP-Raten bis auf wenige Ausnahmen kleiner als 0.3. Eine dieser Ausnahmen ist in Abb. 4-14 dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass beim GRTK am 31.01. und am 02.02. ein Sekunden-Peak von nahe 12 bzw. ungefähr 2 auftrat. Als Grund für dieses Verhalten erwies sich jeweils die Nichtnutzung einer großen Anzahl von

Satelliten zur Positionierung, wobei zwischen diesen Satelliten kein Zusammenhang zu Elevation, Azimut oder geringem SNR hergestellt werden konnte. Bei GGEG treten große HDOP-Werte für ca. 15 min zwischen 12:30 und 13 Uhr auf. Grund hierfür war jeweils eine ungünstige Satellitenkombination.

Die gesamten Analyseergebnisse sind in [TN-P 4] nachlesbar.

### **POSITIONSANALYSE**

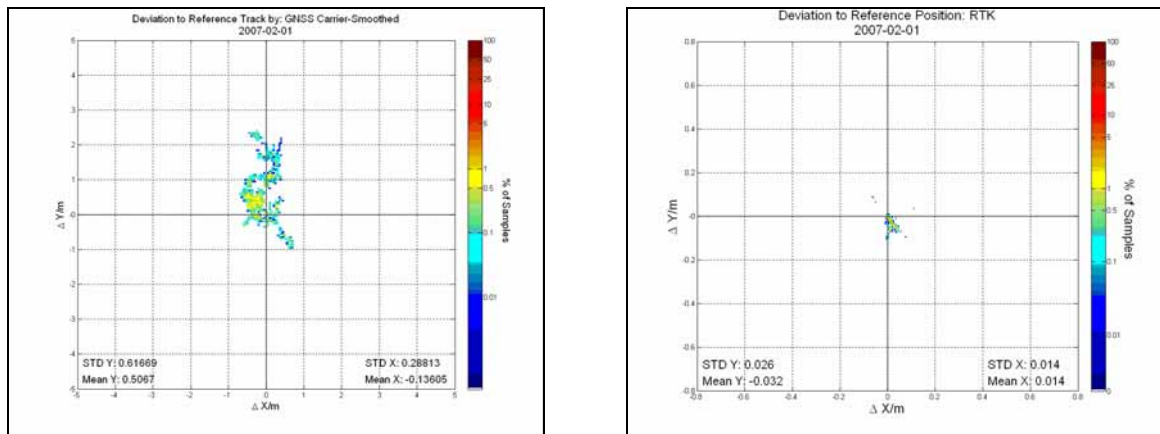
Für die Analyse der Genauigkeit und Verfügbarkeit der Position wurden Differenzen zwischen einer hochgenauen Referenzposition bzw. Referenztrajektorie und der von den einzelnen Empfängern bestimmten Position gebildet. Zur Erzeugung dieser Referenzen wurde die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen, auf TTC basierenden Methoden verwendet.

In Abhängigkeit vom eingesetzten Positionsbestimmungsverfahren sind folgende Erwartungswerte an die Genauigkeit aus der Literatur entnehmbar:

1. „Stand alone“-basierte Positionsbestimmung nutzt nur die verfügbaren Navigationssignale zur Positionierung. Werden Signale auf 2 Trägerfrequenzen genutzt, so ist eine autonome Ionosphärenkorrektur möglich. Durch Einsatz des „Carrier-Smoothing“-Verfahrens kann dabei eine gewisse Unterdrückung des Coderauschens und von Mehrwegefehlern erreicht werden. Werden ergänzend zu den GPS-Signalen auch GLONASS-Signale genutzt, so wird die Verfügbarkeit von GNSS-Signalen zur Positionsbestimmung stabilisiert. Unter Einsatz all dieser Methoden werden Genauigkeiten von einigen Metern erwartet.
2. Wird phasenbasiertes DGNSS auf 2 Trägerfrequenzen genutzt, so werden in der Literatur [Wellenhof-2003], [Rothacher-2007] folgende Genauigkeiten im Nahbereich der Referenzstation angegeben:
  - a. Real Time Kinematic (RTK) Float Positions; typische Genauigkeit bei kinematischen Anwendungen etwa 1.0 bis 2.0 Meter
  - b. Real Time Kinematic (RTK) Fixed Solutions; typische Genauigkeit unter 0.1m
3. WAAS und EGNOS wurden primär entwickelt, um die Integrität von einfrequenzbasierter Positionsbestimmung zu gewährleisten und um die Genauigkeit durch Bereitstellung von z.B. Ionosphärenkorrekturen zu erhöhen. Eine reine C/A-Code-basierte Lösung, in der keine zusätzliche Mehrwegeunterdrückung aktiviert ist, lässt folglich Genauigkeiten von 1 bis 3 Metern erwarten.

Bei dynamischen Anwendungen dieser Verfahren, bei denen im Gegensatz zur Vermessung verstärkt mit zeitlich veränderlichen Störgrößen und wechselnden Umgebungsbedingungen zu rechnen ist, ist folglich auch der Zeitverlauf der erzielten Genauigkeit von besonderem Interesse. Als repräsentative Ergebnisse sind die Genauigkeiten des „stand alone“-Verfahrens und des phasenbasierten DGNSS (RTK) in Abb. 4-15 dargestellt.

Aus den Grafiken ist erkennbar, dass die Genauigkeitserwartungen aus der Literatur durch diese Messergebnisse weitestgehend bestätigt werden. Durch die hohe Signalverfügbarkeit während der Messkampagne (30 GPS Satelliten plus 4 GLONASS-Satelliten) führten detektierte Signalstörungen in den Rohdaten zu keinem signifikanten Genauigkeitsverlust. Wie bereits bei der NMEA-Datenanalyse ausgeführt, waren die HDOP-Werte zu fast jedem Zeitpunkt kleiner als 2 und damit als gut zu bezeichnen, selbst wenn, wie beim GGEG, nur GPS verwendet wurde. Die Streuung innerhalb der HDOP-Werte war gering. Eine direkte Proportionalität zwischen Positionsfehler und HDOP-Werten ließ sich in den vorhandenen Daten nicht nachweisen, so dass die signalspezifischen Einzelfehler genutzter Satellitensignale primär die erreichbare Genauigkeit bestimmen.



**Abb. 4-15 Häufigkeit der horizontalen Positionsfehler für zweifrequenzbasierte „stand alone“ GPS/GLONASS-Positionierung unter Verwendung des „Carrier Smoothing“-Verfahrens (links) und phasen und zweifrequenzbasiertes DGPS (rechts)**

Lediglich beim phasenbasierten DGNSS konnten Einschränkungen in der Positionierungsverfügbarkeit und auch Genauigkeit festgestellt werden. So beziehen sich die in Abb. 4-15 dargestellten Ergebnisse auf die Bedingung „RTK fixed“, die u.a. an die zeitsynchrone, bordseitige Verfügbarkeit von Ergänzungssignalen der Referenzstation gebunden ist. Mit zunehmendem Alter verfügbarer Korrekturdaten in Folge instabiler oder unterbrochener Kommunikationsverbindungen zur Referenzstation ist eine deutliche Zunahme des Positionsfehlers bis in den Meter-Bereich beobachtbar. Bei einer länger anhaltenden Nichtverfügbarkeit von Korrektursignalen schaltet der Empfänger dann auf den „stand alone“-Modus um. Eine daraus wesentliche Schlussfolgerung ist, dass die Integrität von phasenbasierten DGNSS-Verfahren durch die Integrität und Verfügbarkeit des Kommunikationskanals mitbestimmt wird.

Die gesamten Analyseergebnisse sind in [TN-P 3] nachlesbar.

#### **4.2.2.4 Schlussfolgerung und Entwicklungsbedarf**

Die mit phasenbasiertem DGNSS erzielten Ergebnisse belegen, dass dieses Verfahren durchaus geeignet ist, um eine hochgenaue Positionsbestimmung unter Nutzung von Informationen einer Referenzstation für die Schiffsnavigation zu erzielen.



**Abb. 4-16 Seekanal: Einfahrt in das Untersuchungsgebiet im Rostocker Hafen**

Deutlich wurde jedoch auch, dass eine Nutzung von phasenbasierten DGNSS-Verfahren (um insbesondere die von der IMO gestellten Genauigkeits- und Integritätsanforderungen erfüllen zu können) weiterführende Entwicklungsarbeiten impliziert. So kann z.B. aus diesen

Ergebnissen nicht geschlussfolgert werden, dass die eher moderaten Mehrwegefehler während der Messfahrten allgemeingültig auf jede Situation (schiffs- als auch landseitig) übertragbar sind. Dies wird bereits durch die in Werftnähe gewonnenen Messergebnisse untermauert. Folgeuntersuchungen werden als notwendig erachtet, um das Mehrwegeverhalten in der Nähe von Kai-Anlagen sowohl für Schiffe als auch für landseitige Nutzer zu bestimmen.

Aus folgenden Tatsachen,

- dass bei der Anwendung von phasenbasierten DGNSS-Vermessungen immer noch Probleme existieren (siehe [Brunkhorst-2006]), die nur durch Wiederholung von statischen Messungen geeignet reduziert werden können,
- dass für diese Verfahren ein geeignetes Integritätsmonitoring insbesondere für dynamische, sicherheitskritische Anwendungen eine offene Aufgabenstellung ist,
- dass die Zulassung von phasenbasiertem GBAS durch die IMO und IALA erst die technische Machbarkeit und einen längerfristigen Leistungsnachweis erfordert

lässt sich der noch bestehende Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und experimentellen Erprobungen ableiten.

## **4.3 Aufbau des experimentellen GBAS**

### **4.3.1 Architekturdesign**

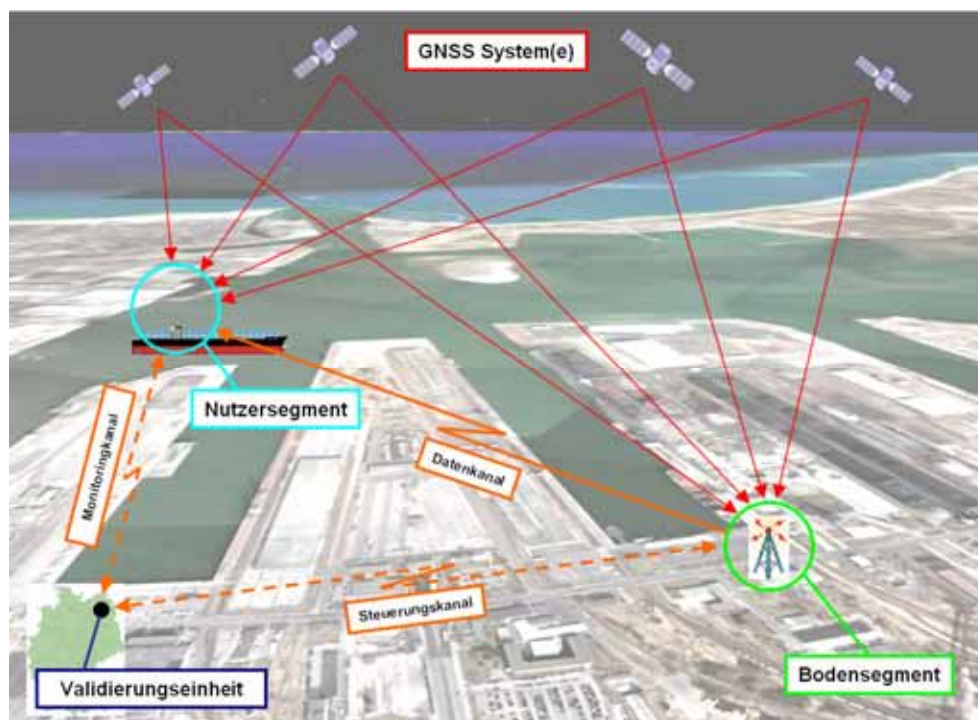
Unter dem Begriff GBAS werden Systeme verstanden, die die Anwendung differentieller GNSS Verfahren unterstützen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit mit GNSS erzielbarer Positionslösungen in lokal begrenzten Gebieten zu erhöhen. Prototypen von GBAS werden derzeit vor allem für Flughäfen zur Unterstützung von Landeanflügen entwickelt. Diese beruhen auf der Installation einer Mehrempfängerarchitektur (meist 4 GPS-Empfänger) zum redundantem Empfang der Signale von Navigationssatelliten, der gemeinsamen kontrollierten Signalverarbeitung im Bodensegment (LAAS Ground Facility) sowie der Verteilung bereitgestellter Korrekturinformationen über VHF Data Broadcast Links an die Flugzeuge (Nutzersegment).

Angelehnt an diese Architektur wurde im Projekt ALEGRO eine GBAS Station für das maritime Umfeld des Rostocker Hafens konzipiert. Im Unterschied zu LAAS Systemen der Luftfahrt, welche auf Basis internationaler Standards derzeit nur auf Grundlage von 1-Frequenzverfahren operieren, wurde für das maritime GBAS der Fokus auf die Möglichkeit des Multifrequenzempfanges gelegt, d.h. des Empfanges von Signalen auf mehr als 2 Frequenzen. Weiterhin wurde in der Konzeptionsphase festgelegt, sich auf die Nutzung und Weiterentwicklung phasenbasierter Verfahren zu konzentrieren, um überhaupt die IMO-Anforderungen für Hafenbereiche erfüllen zu können.

Die prinzipielle Systemarchitektur eines experimentellen GBAS, die im Rahmen des Projekts ALEGRO für den Hafen Rostock vorgesehen war, ist in Abb. 4-17 dargestellt.

Das experimentelle GBAS System ist damit im Wesentlichen aus den Hauptkomponenten Bodensegment und Nutzersegment aufgebaut. Die Hauptaufgabe des GBAS Bodensegments besteht darin, die Systemintegrität aller für das GBAS System nutzbaren GNSS zu überwachen und Korrektursignale für das GBAS Nutzersegment zur Verfügung zu stellen. Zwischen Bodensegment und Nutzersegment war folglich eine unidirektionale Verbindung in Richtung des Nutzersegments vorzusehen, um Korrekturdaten des Bodensegmentes an das Nutzersegment weiterleiten zu können.





**Abb. 4-17 Grundlegende Systemarchitektur des maritimen GBAS**

Für den Nachweis der erreichbaren Genauigkeit und Zuverlässigkeiten GNSS/GBAS-basierter Ortung war der Aufbau eines GBAS-Nutzersegment erforderlich, dass auch für Testzwecke potentiellen Nutzern zur Verfügung gestellt werden kann. Zudem sollte es möglich sein, über optionale Steuerungs- und Monitoringkanäle sowohl das Boden- als auch Nutzersegment an eine externe Validierungseinheit ankoppeln zu können. Zusammengefasst waren damit für die Detailplanung folgende Grundanforderungen zu erfüllen:

- 1.) Das GBAS-Bodensegment als auch das GBAS-Nutzersegment sind mit geeigneten Messgeräten (Empfängern) auszustatten, die den parallelen Empfang von GNSS-Navigationssignalen auf mehreren Trägerfrequenzen unterstützen.
- 2.) Wesentliche Komponenten des GBAS-Bodensegment, die zu entwickeln und implementieren sind, müssen die eingehenden Datenströme derart verarbeiten können, um Qualitätskenngrößen als auch Korrektursignale in Echtzeit bereitstellen zu können.
- 3.) Eine geeignete Archivierung empfangener und prozessierter Daten ist erforderlich, um kurzfristig weiterführende Entwicklungen und Validierungsmaßnahmen und längerfristig die Standardisierung und Zulassung von Verfahren zu unterstützen.
- 4.) Durch das GBAS-Bodensystem müssen Korrekturdaten und Integritätsinformationen an das Nutzersegment über Funkkanal und/oder Internet übertragbar sein.
- 5.) Das Nutzersegment muss an das Internet über einen Breitbandanschluss (z.B. UMTS) angebunden werden, um einerseits über diesen Kanal die Korrekturdaten empfangen und zu können und um andererseits seine Prozessierungsergebnisse an die Validierungseinheit übertragen zu können.
- 6.) Das Nutzersegment muss mobil auf verschiedenen Geräteträgern einsetzbar sein, um die Verfahren in verschiedenen Applikationsszenarien erproben zu können.
- 7.) Das experimentelle GBAS-Bodensegment sollte ferngesteuert über Internet betrieben werden können, um den Betriebsaufwand gering zu halten (kein Vorort-Operator)



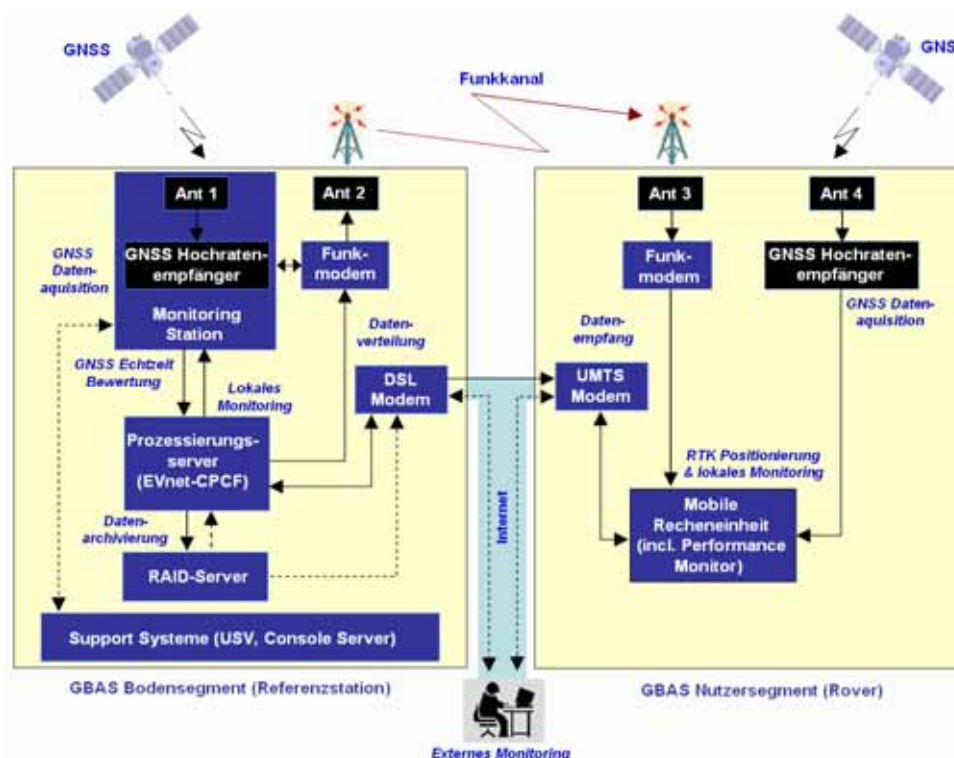
und um das Upgrading der Bodensegments vom Entwicklungsstandort aus zu ermöglichen.

Aus diesen Anforderungen wurde eine Komponentenliste für das Boden- bzw. Nutzersegment erstellt (Tab. 4-1).

**Tab. 4-1 Erforderliche Komponenten für GBAS Boden- und Nutzersegment**

Komponente	Bodensegment	Nutzersegment
GPS/Galileo-Empfänger + Antenne	x	x
Datensende- und Empfangseinheit über Funkkanal	x	x
Modem für Internetanbindung	x	x
Feste Monitorstationseinheit	x	
Prozessierungsserver	x	
Server zur Datenarchivierung	x	
Mobile Recheneinheit		x

Die darauf aufbauende Grobarchitektur ist in Abb. 4-18 dargestellt.



**Abb. 4-18 Blockschaftbild des GBAS HW-Gesamtsystemarchitektur**

Dafür wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

1. Für die Akquisition, Prozessierung und Verteilung von Daten sollte das im DLR entwickelte EVnet (Experimentier- und Verifikationsnetzwerk) genutzt werden, um Neuentwicklungen in diesem Bereich zu vermeiden. Dieses Netzwerk beruht auf Internet-Streaming Technologien des Icecast Broadcasters. Es ermöglicht damit die Verteilung jeglicher Art von Daten mittels des TCP/IP Protokolls über Internet auf Grundlage eines einheitlichen Datenprotokolls. Das EVnet dient auch als

Entwicklungs- und Validierungsumgebung von Prozessoren und Client-Anwendungen sowohl auf Seiten des Bodensegments als auch des Nutzersegments.

2. Die einzusetzenden GNSS Empfänger sollen über die Möglichkeit verfügen, ihre verarbeiteten Rohdaten (Range- und Phasenmessungen, Amplitudenmesswerte etc.) mit einer Updaterate größer 10 Hz (hochratig) ausgeben zu können. Dies ist erforderlich, um auf einer kurzzeitigen Datenhistorie Genauigkeits- und Integritätsbewertungen des GNSS als auch des GBAS durchführen zu können. Zudem sollten die Empfänger über die Möglichkeit verfügen, phasenbasierte Korrektursignale im RTCM 3.x Format zu erzeugen und selbst verarbeiten zu können (bis max. 20 Hz).
3. Für den Datenaustausch zwischen dem Boden- und Nutzersegment sollte sowohl ein Funkband als auch das Internet nutzbar sein. Der Empfang terrestrisch abgestrahlter Signale über das Funkmedium sollte in einem Umfeld von mindestens 3 km um den Standort des Bodensegments möglich sein.

Das GBAS System arbeitet entsprechend Abb. 4-18 nach folgender Funktionsweise:

In der Referenzstation (Bestandteil des GBAS-Bodensegments) empfängt ein Hochratenempfänger GNSS-Signale und stellt sie einem angeschlossenen Prozessierungsserver zur Verfügung. Dieser Server prozessiert die Daten in Echtzeit und stellt daraus u.a. abgeleitete Korrekturinformationen bereit. Alle gewonnenen und generierten Daten werden zu dem an einen RAID Server zur Archivierung verteilt.

Diese sind über ein Funkmodem bzw. das Internet an den Nutzer zu übertragen. Da die Korrekturinformationen nur eine geringe Bandbreite erfordern, ist für die Übertragung über das Funkmodem eine Kanalkapazität von 19200 Baud ausreichend. Über das Internet werden neben den Korrekturdaten auch Rohdaten und Prozessierungsdaten übertragen, so dass hierfür eine DSL Verbindung mit einer Upoad-Rate von bis zu 512 KB pro Sekunde als notwendig erachtet wurde. Die übertragenen Korrekturinformationen werden auf Seiten des Nutzersegments entweder über ein Funkmodem oder über ein UMTS Modem empfangen. Das Funkmodem hat auch hier nur eine Bandbreite von 19200 Baud zur Verfügung zu stellen, währenddessen im Hinblick auf die Übertragung zusätzlicher Integritätsinformationen über das Internet sowie die erforderliche Mobilität des Nutzers als zweite optional nutzbare Variante ein UMTS Anschluss eingeplant wurde. Durch den UMTS Anschluss wird zudem der real nutzbare Bereich von Korrekturinformationen deutlich erhöht, da hier nicht die Funkreichweitenbegrenzungen des Funkmodems zutreffen (siehe auch Kapitel 4.3.4).

Seitens des Nutzersegments ist ebenfalls ein Hochratenempfänger im Einsatz, der GNSS-Signale empfängt und an die mobile Rechneinheit weiterleitet. Unter Nutzung dieser Daten sowie der über Funkmodem oder UMTS empfangenen Korrektursignale ist die mobile Nutzereinheit in der Lage, eine differentielle, phasenbasierte Positionierung vorzunehmen.

Durch die Vernetzung der GBAS-Komponenten untereinander und ihrer Anbindung an das DLR über Breitübertragungsanbindung (DSL-WAN bzw. DSL-UMTS) ist es derzeit möglich, den Betrieb des GBAS-Bodensegments als auch des GBAS-Nutzersegments von verschiedenen Standorten aus zu monitoren.

#### **4.3.2 Komponentenauswahl und –integration**

Die Beschreibung der Komponentenauswahl und zugeordneter Integrationsarbeiten erfolgt aufgeschlüsselt nach einzelnen HW-Komponenten:

**GNSS-EMPFÄNGER (BODENSEGMENT UND NUTZERSEGMENT)**

Es wurde angestrebt, dass die eingesetzten GNSS-Empfänger den Empfang von Signalen der operativen Satellitensysteme GPS und GLONASS und auch zukünftiger GNSS wie Galileo ermöglichen.

Durch die Entwicklungsverzögerung von GALILEO bedingt sind derzeit nur 2 Testsatelliten, der GIOVE-A und der GIOVE-B, im Orbit.

- Dies führte einerseits zu Verzögerungen bei der Bereitstellung von GALILEO-tauglichen Empfängern. Ihre Validierung und damit auch Nutzung im GBAS ist eine noch offene Aufgabe, die aus den Rahmenbedingungen heraus in der Projektlaufzeit von ALEGRO nicht umgesetzt werden konnte.
- Andererseits erfordert eine Mitverarbeitung im GBAS, dass mindestens 4 Satelliten eines GNSS gleichzeitig zur Verfügung stehen, um z.B. eine Zeitsynchronisation mit den bereits operativ nutzbaren GNSS zu erreichen. Diese Randbedingung ist jedoch an die noch offene In-Orbit Validierungsphase von Galileo gebunden, so dass eine Mitnutzung von GALILEO-Signalen im GBAS derzeit technisch nicht möglich war.

Bei der Auswahl der Empfänger konnte folglich nur darauf geachtet werden, dass sie prinzipiell für einen Empfang von Galileo-Signalen vorbereitet sind. Ihre endgültige Qualifizierung durch einfache Firmwareupdates und darauf aufbauender Validierungsmaßnahmen im GBAS-Experimentalsystem sollte dann zügig nach Erfüllung der externen Randbedingungen erfolgen können.

In beiden Segmenten eingesetzte Empfänger sollten die Eigenschaft aufweisen, Rohdaten mit einer Samplingfrequenz von mindestens 20 Hz auszugeben. Dies ist erforderlich, um Genauigkeits- und Integritätsbewertungen innerhalb weniger Sekunden vornehmen zu können. Darüber hinaus sollten sie firmwaretechnisch in der Lage sein, phasenbasierte Differentialverfahren durch Bereitstellung bzw. durch Nutzung entsprechender Ergänzungssignale im RTCM-Format zu unterstützen. Vor diesem Hintergrund wurde sich für Produkte der Firmen TOPCON und Javad entschieden, die zudem im DLR bereits hinreichend in Bezug auf GPS- und GLONASS-Signale verifiziert wurden. Weiterführende Untersuchungen zeigten, dass insbesondere die Firmwareerweiterungen für phasenbasiertes GBAS erheblich die Prozessorleistung der genutzten Empfänger beansprucht, wenn diese parallel auch zur hochratigen Datenbereitstellung genutzt werden.

Daher wurde es als notwendig erachtet, für die parallele Ausgabe von Rohdaten jeweils einen zweiten Empfänger beizustellen, um die Ausfallsicherheit und eine hohe Datenqualität der Empfänger zu gewährleisten. Von den 4 eingesetzten Empfängern (2 im Bodensegment und 2 im Nutzersegment) sind daher zwei als Beistellungen des DLR zu verstehen, die nicht über Projektmittel beschafft wurden.



**Abb. 4-19 Ausgewählte GNSS-Empfänger (TOPCON EGGD, TOPCON NetG3, Javad TRIUMPH)**

**GNSS-ANTENNEN (BODENSEGMENT, UND NUTZERSEGMENT)**

Für GBAS werden für das Bodensegment Choke-Ring Antennen empfohlen, die durch den Einsatz metallischer Ringelemente um die Antenne herum, seitlich und von unten einfallende Mehrwegesignale unterdrücken können. Für das Nutzersegment reicht es hingegen aus, eine omnidirektional wirkende Patchantenne einzusetzen. Beide Antennen mussten zudem der Anforderung standhalten, neben GPS-Signalen auch zukünftig Galileo Signale des SoL Services (L1, E5a) empfangen zu können. Vor diesem Hintergrund sowie einer gewünschten Systemkompatibilität zu den Empfängern wurde Antennen der Hersteller TOPCON und Javad ausgewählt.



**Abb. 4-20** Ausgewählte GNSS-Antennen (Javad GrAnt, TOPCON CR-G3 – ohne und mit Radome)

**4-FACH ANTENNENVERTEILER (BODENSEGMENT UND NUTZERSEGMENT)**

Da sich im Boden- und Nutzersegment für jeweils 2 Empfänger entschieden wurde und diese an ein und derselben Antenne zu betreiben waren (gleiche Ausbreitungsfehlerbedingungen), mussten Antennenverteiler beschafft werden. Der Antennenverteiler dient dazu, die Signale von den GNSS-Antennen des Bodensegments sowie des Nutzersegments an bis zu 4 Empfänger ohne Signalverlust verteilen zu können. Der Antennenverteiler im Nutzersegment ist eine Beistellung des DLR und wurde nicht aus Projektmitteln beschafft.



**Abb. 4-21** 4-fach Antennenverteiler (GPS Networking)

**FREQUENZNORMAL (BODENSEGMENT)**

Erfahrungen aus der Validierung oben genannter Empfänger haben gezeigt, dass bei ausschließlicher Nutzung des intern enthaltenen Frequenznormals auf Basis eines Quarzes gehäuft Uhrenrücksetzoperationen auftreten, in deren Folge oftmals Unstetigkeiten im Zeitverlauf der Phasen entstehen. Da diese sich letztlich negativ auf die Signalqualität und Datenverfügbarkeit der Referenzstation auswirken, wurde entschieden, externe Frequenznormale einzusetzen, die auf Grundlage eines hochgenauen Oszillator (Rubidium-Normal), die GNSS-Empfänger mit einer konstanten Taktrate von 10 MHz versorgen.



**Abb. 4-22 Frequenznormal (Temex LPRFS)**

### **WETTERSENSORIK (BODENSEGMENT)**

Laufzeitfehler von GNSS-Signalen beruhen u.a. auf dem Einfluss der in der Troposphäre vorhandenen Teilchen (z.B. Wasserdampf). Diese führen zu Laufzeitfehlern, die sich letztlich in einem Positionsfehler abbilden. Prinzipiell sind die eingesetzten Empfänger in der Lage, auf Basis von Modellen den Troposphärenfehler abzuschätzen. Eine Genauigkeitssteigerung der modellbasierten Korrektur von troposphärischen Ausbreitungsfehlern lässt sich erreichen, wenn anstatt statistischer Referenzparameter real gemessene, meteorologische Daten genutzt werden.



**Abb. 4-23 Wetterstation (EPSA Datenlogger & Außensensor)**

Das begründet den Einsatz von Sensoren zur Bestimmung von Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte am Referenzstandort und die Integration dieser Wetterstation in das Bodensegment. Die eingesetzte Wetterstation stellt Messwerte von Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck mit Taktraten bis zu 10 Hz bereit.

### **FUNKMODEM (BODENSEGMENT UND NUTZERSEGMENT)**

GBAS basiert darauf, Nutzer mit ergänzenden Korrekturinformationen zu versorgen. Für die dazu notwendige Datenaussendung bzw. den Datenempfang auf Funkebene wurde sich für den Einsatz von Funkmodems der Firma Satel entschlossen. Diese Funkmodems zeichnen sich dadurch aus, dass

- sie mit einer geringen Sendeleistung betrieben werden können,
- in frei verfügbaren Sendebereichen senden und empfangen können
- alternativ auf zwei Frequenzen arbeiten zu können.

Interessant ist die letzte Eigenschaft dann, wenn auf einer Frequenz Störsignale auftreten und damit automatisch auf eine zweite Frequenz gewechselt werden kann. Für die Ausstrahlung von Signalen ist keine Berechtigung notwendig, insofern die Sendeleistung von 0.5 W nicht überschritten wird. Als nutzbarer Frequenzbereich wurde das P-Band und darin die Frequenz 433 MHz für die Ausstrahlung der Korrektursignale ausgewählt.

Quasi ist es jedem Anwender im Hafenbereich dadurch möglich, wenn er über ein entsprechendes Funkmodem in diesem Frequenzbereich verfügt, die vom ALEGRO GBAS

ausgestrahlten Korrektursignale zu nutzen. Die Korrektursignale werden im RTCM 3.0 Format übertragen.



**Abb. 4-24 Funkmodem (Satel 3AS (d))**

#### **MONITORINGSTATIONSSERVER (BODENSEGMENT)**

Für die Ansteuerung des gesamten GBAS Bodensegments war ein Server zu beschaffen, der auf Basis der EVnet Technologie (HW und SW) mit dem Betriebssystem LINUX OpenSuse 10.x arbeiten kann. Da sämtliche im DLR eingesetzte EVnet Komponenten auf DELL Servern laufen, wurde auch für ALEGRO nicht davon abgewichen. Der Server musste über eine Vielzahl von Schnittstellen (2\*Ethernet, 8\*seriell, USB) verfügen, um den Anforderungen an den Anschluss aller Sensoren gerecht zu werden. Zudem mussten die seriellen Anschlüsse über Datenraten von bis zu 920 kBaud verfügen (sogenannte serielle Ultra-Ports). Weiterhin musste auch die Rechenleistung des Servers ausreichend bemessen sein, um den Empfang und die Weiterleitung der Sensordatenströme, ein darauf aufbauendes Monitoring des gesamten GBAS Bodensegments sowie die Aufgaben der Datenarchivierung leisten zu können. Insofern wurde sich für einen leistungsstarken Server aus der Power Edge Serie entschieden.



**Abb. 4-25 Monitoringstationsserver (DELL Power Edge 1950)**

#### **PROZESSIERUNGSSERVER (BODENSEGMENT)**

Die komplette Prozessierung der eingehenden Datenströme in ALEGRO sollte ebenfalls auf der Basis der EVnet Technologie erfolgen. Um aufwendige Neuentwicklungen im Projekt zu vermeiden. Bisher handelte es sich bei der EVnet Prozessierungseinheit um ein zentrales Rechencluster am Standort Neustelitz. Für ein autark arbeitendes GBAS System war dieser technische Ansatz jedoch nicht nutzbar. Insofern wurde ein neues Konzept entworfen welches darauf beruht, einen EVnet-Klon zu entwickeln, der über die gleiche Funktionalität wie das EVnet am Standort Neustelitz verfügt, jedoch flexibel einsetzbar ist und über erweiterte Funktionalitäten verfügt. Konkret wurde sich entschieden, dafür einen so genannten virtuellen Plattformserver aufzusetzen. Virtuell meint, dass der Server selbst zwar eine reale HW abbildet, die gesamte Prozessierungseinheit von EVnet (CPCF – Central Processing and Control Facility) jedoch auf Basis virtueller Maschinen (VM) besteht. Für diese Arbeiten wurde seitens des zu beschaffenden Servers und der Installation der virtuellen Netzwerktechnik die Firma T-Systems beauftragt. Als Server kam daher ein System



der Firma L&S Computersysteme zum Einsatz, welches sich im DLR schon vielfach an anderen Stellen für Aufgaben der Virtualisierung bewährt hat. Im Rahmen des Berichtes wird der Prozessierungsserver oftmals auch als virtueller CPCF Server oder virtueller Plattformserver (VPS) bezeichnet.



**Abb. 4-26 Prozessierungsserver (L&S Computersysteme)**

#### **ARCHIVIERUNGSSERVER – RAID-SERVER (BODENSEGMENT)**

Da im Projekt ALEGRO eine Vielzahl von Daten aufgezeichnet werden, die Nutzern und auch absehbaren Folgeprojekten als Datengrundlage dienen sollen, war ein Archivierungssystem aufzusetzen. Prinzipiell hätte dies zunächst im Monitorstationsserver oder auch im virtuellen Plattformserver als Zusatzfunktion verankert werden können. Um jedoch die Aufgaben der Prozessierung (Virtueller Plattformserver), der Datenakquisition bzw. des Prozessmonitorings (Monitorstationsserver) sowie der Datenarchivierung voneinander zu entkoppeln, wurde sich dafür entschieden, einen RAID Server einzusetzen. Diesem kommt einzig die Aufgabe zu, alle im Bodensegment prozessierten Daten zu speichern und zu archivieren. Der Zugriff auf Datenprodukte erfolgt über ein spezielles WEB-Interface auf der Grundlage von EVnet. Folglich wurde sich für ein RAID System auf Basis des DELL Power Edge 2900) mit einer Plattenkapazität von rund 4 TB auf RAID Level 5 entschieden.



**Abb. 4-27 RAID Server (DELL Power Edge 2900)**

#### **CONSOLE SERVER UND SCHALTBARE STECKDOSENLEISTE (BODENSEGMENT)**

Da es sich beim Bodensegment um ein autark arbeitendes System handelt, waren Vorkehrungen zu treffen, eine Remote-Überprüfung aller angeschlossener HW Komponenten durchführen zu können und gegebenenfalls durch „hartes“ Rückschalten der Geräte wieder in einen ordnungsgemäß arbeitenden Zustand zu versetzen. Dies ist z.B. dann erforderlich, wenn ein GNSS-Empfänger in einen CPU Overload Zustand gerät oder eine HW Komponente nicht mehr auf Steuerungssignale von außen reagiert. Der Console Server und die damit direkt verbundene schaltbare Steckdosenleiste ermöglichen es, Monitoring- und Schaltaufgaben über Terminalverbindungen auf Ebene serieller Schnittstellen auszuführen. Für das GBAS Bodensegment wurde sich für HW der Firma Avocent entschieden, da diese Geräte seit langem in allen vom DLR betriebenen Monitorstationen erfolgreich eingesetzt werden.



**Abb. 4-28 RAID Server (Avocent Console Server, Avocent Schaltbare Steckdosenleiste)**

#### **MOBILE RECHENEINHEIT – LAPTOP (NUTZERSEGMENT)**

Für das Nutzersegment war es erforderlich, ein geeignetes Datenaufzeichnungsgerät zu beschaffen, das im Sinne einer mobilen Recheneinheit zur Ermittlung, Aufzeichnung und Echtzeitdarstellung von Positionsergebnissen genutzt werden kann. Da im Umfeld des Rostocker Hafens die Nutzung sowohl auf dem Land als auch auf dem Wasser ermöglicht werden sollte, wurde ein spritzwassergeschützter und stoßsicherer Laptop der Fa. Wortmann beschafft. Der Laptop musste zudem über alle notwendigen Schnittstellen zum Anschluss der GNSS-Sensorik (seriell, USB, Ethernet) sowie zum Empfang von Korrektursignalen (Ethernet) verfügen. Letztlich sollte auch die Rechenleistung ausreichend bemessen sein, um in Echtzeit auf Basis des in ALEGRO zu entwickelnden Positionslösers arbeiten zu können. Das System verfügt daher über einen DUAL Core Prozessor und 4 GB RAM. Für die Datenaufzeichnung steht eine externe USB-Festplatte mit 500 GB Datenvolumen zur Verfügung.



**Abb. 4-29 Mobiler Rechner (Wortmann Terra Mobile)**

#### **UMTS ROUTER (NUTZERSEGMENT)**

Prinzipiell ist es durch den Einsatz des bereits beschriebenen Funkmodems nutzerseitig möglich, abgestrahlte Korrektursignale im Umfeld des GBAS Bodensegmentes empfangen zu können. Da jedoch die Reichweite dieser Funksignale von der Signalstärke abhängig ist und bereits ab einer Entfernung von 1 km durch Abschattungen vereinzelt Ausfälle des Funksignals zu beobachten sind, wurde sich dafür entschieden, dass das Nutzersegment optional mit einem UMTS Router ausgestattet wird. Dieser erlaubt den Empfang von Korrektursignalen überall, insofern eine UMTS oder GSM Verbindung aufgebaut werden kann. Damit wird abgesichert, dass im gesamten Umfeld des Rostocker Hafens sowie darüber hinaus der Empfang der Korrektursignale gewährleistet ist. Der UMTS Router ist eine optionale Beistellung des DLR und wurde nicht aus Projektmitteln beschafft. Da bei seinen Einsatz Verbindungskosten für jedes übertragene Datenpaket entstehen, ist der Einsatz vorerst auf Messkampagnen und Demonstrationen beschränkt.



**Abb. 4-30 UMTS Router (Linksys)****ETHERNET SWITCH (BODENSEGMENT)**

Das Bodensegment enthält eine Reihe von Servern und HW Komponenten, die über Ethernetschnittstellen miteinander kommunizieren (Steuerung, Datenaustausch etc.) müssen. Zur Kopplung all dieser Komponenten über ein internes LAN innerhalb des Bodensegments (private Network) wird ein Ethernet Switch der Firma D-Link eingesetzt, der im Adressbereich 192.168.42.0/24 operiert. Der Switch erlaubt im internen Netzwerk eine Übertragungsbandbreite von bis zu 1 Gbit/s.

**Abb. 4-31 Ethernet-Switch (D-Link)****USV (BODENSEGMENT)**

Die Entwicklung und der Einsatz von GBAS unterliegen sicherheitskritischen Anforderungen im Kontext von „Safety of Life“. Folglich ist Sorge dafür zu tragen, dass derartige System auch im Falle eines kurzzeitigen Stromausfalls weiterhin ihren Dienstanforderungen gerecht werden. Als Supportkomponente wurde daher eine Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) der Firma APC in das GBAS-Bodensegment integriert, die Stromausfälle bis zu etwa einer Stunde überbrücken kann. Sie ist auch in der Lage, Spannungsspitzen von den HW-Systembestandteilen des Bodensegments fern zu halten. Des Weiteren ist die USV mit Zusatzkarten für die Remote-Überwachung per serieller Schnittstelle sowie per Ethernet ausgestattet. Dadurch werden Ausfälle in der Stromversorgung an einen Operator zeitnah kommuniziert. Für das GBAS Bodensegment wurde sich für USV der Firma ACS entschieden, da diese Geräte seit langem in allen vom DLR betriebenen Monitorstationen erfolgreich eingesetzt werden.

**Abb. 4-32 USV (APC 2200, Smart Slot Triple Chassis)**

**SERVERSCHRANK UND SCHRANKÜBERWACHUNG (BODENSEGMENT)**

Zum Erfüllen von Sicherheitsanforderungen wurde festgelegt, alle Komponenten in einem verschließbaren Serverschrank zu installieren und über eine spezielle HW sowohl die Temperatur im Innenraum des Serverschranks als auch den Schließzustand des Serverschranks zu überwachen. Für das GBAS Bodensegment wurde sich für Schränke der Firma Knürr entschieden, da diese Geräte seit langem in allen vom DLR betriebenen Monitorstationen erfolgreich eingesetzt werden.



**Abb. 4-33 Schranküberwachung (Knürr RMS Compact)**

**DSL ROUTER (BODENSEMENT)**

Für die Außenanbindung und das Monitoring des GBAS Bodensegments war es erforderlich über einen geeigneten Internetzugang zu verfügen. Hierzu wurde sich für einen DSL 6000 Anschluss entschlossen, der durch Nutzung einer Zusatzoption über eine Upstreamrate von 512 kB/s verfügt. Diese hohe Upstreamrate ist erforderlich, um einerseits Korrekturdaten der GBAS Station über Internet verteilen zu können und um andererseits sämtliche Monitoring-Funktionalitäten über Remote-Desktops durchführen zu können. Zudem dient die Anbindung auch dazu, archivierte Daten über das Internet downloaden zu können. Der Router war Bestandteil des einzurichtenden DSL Anschlusses der Deutschen Telekom. Die Einrichtung des Routers für den ALEGRO spezifischen Netzwerkverkehr ist in [TN-I 2] beschrieben. Anfallende Betriebskosten wurden im Laufe des Projekts aus DLR-Eigenmitteln erbracht.



**Abb. 4-34 DSL Router (Speedport W 700 V)**

**MOBILER SPEKTRUMANALYZER**

In den benutzten Frequenzbändern für den Empfang von GNSS-Signalen (GPS L1, L2 + zukünftig Galileo L1, E5a, E6) sowie für die Ausstrahlung und den Empfang von Korrektursignalen auf 433 MHz kann es gelegentlich vorkommen, dass durch Telekommunikations-einrichtungen oder private Funkstrahler Störsignale emittiert werden, die zu Interferenzen (Signalüberlagerungen) führen können. Um während der Durchführung von Messkampagnen im Forschungshafen Rostock solche Einflüsse überwachen und Gegenmaßnahmen einleiten zu können (z.B. Wechsel des Frequenzbereiches für Korrektursignale), wurde ein mobiler

Spektrumanalyzer beschafft, der in allen oben genannten Frequenzbereichen nach Störsignalen scannen kann. Sollten z.B. im Bereich von GNSS-Signalen Störungen detektiert werden, so sind Gegenmaßnahmen zunächst kaum möglich. Jedoch die Kenntnis über das Auftreten von Störsignalen dient zur Absicherung der Ergebnisinterpretation in den Bereichen Bodensegment als auch Nutzersegment.



**Abb. 4-35 Spektrum Analyzer (SPEKTRAN HF 6080)**

Die Liste der in ALEGRO für das Bodensegment sowie das Nutzersegment beschafften und installierten HW-Komponenten ist in folgenden Tabellen zusammenfassend dargestellt:

**Tab. 4-2 Technische Komponenten des Bodensegments**

ID <sup>1</sup>	Bezeichnung	Hersteller (Typ)	Bemerkungen
S	Galileo/GPS/GLONASS Empfänger	TOPCON NetG3	20 Hz RTK + Rohdaten
S	GPS/GLONASS Empfänger <sup>2</sup>	TOPCON Legacy EGGD+	Rohdaten (Backup)
S	Galileo/GPS/GLONASS Antenne	TOPCON CR-G3	Choke-Ring-Antenne
S	Wetterstation (incl. Barometer)	EPSA WMS 3	Datenlogger
S	Temperatur/Luftfeuchte	EPSA	Außensensoren
SE	4-fach Antennenverteiler	GPS Networking	
SE	Frequenznormal	Temex LPFRS-01 Q3/S	Zeitstabilisierung
SE	Funkmodem	SATEL 3AS (d)	RTK Funksignale
SE	70 cm P-Band Antenne	SATEL	RTK Funksignale
P	Monitorstationsserver	DELL Power Edge 1950	Datenakquisition / GUI
P	Virtueller Plattformserver	L&S Computersysteme	Prozessierung / CPCF
D	RAID-Server	DELL Power Edge 2900	Daten-Archivierung
F	Console Server	Avocent ACS 8	HW-Überwachung
F	Schaltbare Steckdosenleiste	Avocent PM 10i	HW-Schaltung
F	Schranküberwachung	Knürr RMS Compact	
SV	USV	APC 2200 + Zusatzkarten	Stromversorgung
N	DSL Router	Speedport W 700 V	Netzzugang
N	Ethernet Switch	D-Link DGS 1016D	Internes Netzwerk

<sup>1</sup> Sensoren (S) und zugehörige Erweiterungen (SE), Prozessierungs- (P) und Datenspeicherungssysteme (D), Fernüberwachung (F), Netzwerk (N), Stromversorgung (SV), Messtechnik (M)

<sup>2</sup> temporäre Beistellung durch DLR (nicht projektintern beschafft)

**Tab. 4-3 Technische Komponenten des Nutzersegments**

ID	Bezeichnung	Hersteller (Typ)	Bemerkungen
S	Galileo/GPS/GLONASS Empfänger	Javad TRIUMPH G3T	20 Hz RTK + Rohdaten
S	GPS/GLONASS Empfänger <sup>2</sup>	TOPCON Legacy EGGD+	20 Hz RTK + Rohdaten
S	Galileo/GPS/GLONASS Antenne	Javad GrAnt	omnidirektional
SE	4-fach Antennenverteiler <sup>2</sup>	GPS Networking	
SE	Funkmodem	SATEL 3AS (d)	RTK Funksignale
SE	70 cm P-Band Antenne	SATEL	RTK Funksignale
P	Mobile Recheneinheit (Laptop)	Wortmann Terra Mobile	Datenakquisition / GUI
N	UMTS Modem <sup>2</sup>	Linksys WRT 54G3G	Netzzugang

Als alternativ sowohl am Bodensegment als auch Nutzersegment einsetzbare Komponenten wurden folgende HW ausgewählt und beschafft:

**Tab. 4-4 Technische Komponenten des Boden- und Nutzersegments**

ID	Bezeichnung	Hersteller (Typ)	Bemerkungen
M	mobiler Spektrumanalyzer	SPEKTRAN HF 6080	Stördetektion P-Band

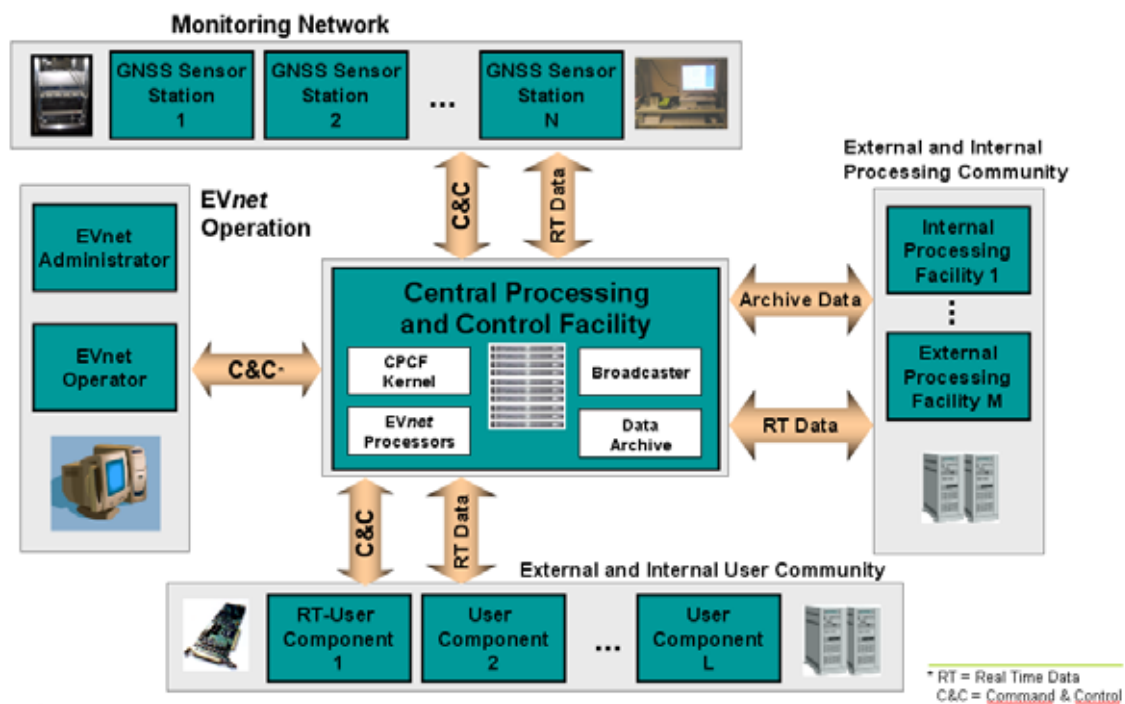
### 4.3.3 EVnet-basierter Systemaufbau

Um den Aufwand zur Entwicklung der erforderlichen SW-Komponenten und die Anbindung der zu nutzenden HW-Komponenten effizient zu gestalten, stützt sich die SW-Entwicklung und die Integration der Infrastrukturkomponenten zur Prozessierung, Verteilung und Aufzeichnung, von Daten auf das vom DLR in Kooperation mit der Firma DJO entwickelte Experimentier- und Validierungsnetzwerk (EVnet) ab.

EVnet stellt ein echtzeitfähiges Netzwerk dar, das aus frei konfigurierbaren modularen HW- und SW-Komponenten besteht, die an den jeweiligen Verwendungszweck und die dabei genutzte Hardware adaptierbar sind (Abb. 4-36). Die Netzwerkstruktur von EVnet eröffnet die Möglichkeit, empfangene und prozessierte Daten internen und externen Nutzern über das Netzwerk bereit zu stellen. Eine der wesentlichen Komponente ist dabei die EVnet-Betriebssoftware, die sich auf vielen kommerziellen Rechnersystemen implementieren lässt und aufgabenspezifische Hardwarekomponenten zu einem operationellen System integriert. Es ist möglich, mittels dieser Software unabhängige aufgabenspezifische EVnet-basierte Systeme zu erstellen. Der wesentliche Unterschied zu anderen GNSS-Datenverteilungsnetzwerken, z.B. NTrip, besteht darin, dass es in EVnet möglich ist, Daten zu prozessieren und so Dienste zu realisieren, die der Verteilung dieser höherwertigen Daten dienen.

Gegenwärtig unterstützt EVnet eine Vielzahl von Aktivitäten des IKN auf den Gebieten Forschung und Entwicklung, Verifikation und Validierung sowie des Aufbaus und Betriebs lokaler und globaler Netzwerke zur Verarbeitung von GNSS-Daten.

EVnet wurde ursprünglich zu Forschungs- und Entwicklungszwecken beim IKN entwickelt. Das beim IKN permanent betriebene System besteht aus einer Reihe weltweit verteilter Monitorstationen sowie einer zentralen Prozessierungs- und Kommandierungseinheit (CPCF) am DLR Standort Neustrelitz.



**Abb. 4-36 Allgemeine Struktur von EVnet-basierten Netzwerken zur Prozessierung von GNSS-Daten und Bereitstellungen GNSS-basierter Dienste**

Im Verlauf der Entwicklung und Nutzung zeigte sich, dass das EVnet SW-Entwicklungen und die Erprobung von Algorithmenentwicklungen generell durch Systematisierung bestens unterstützt. Das erfolgt dadurch, dass die zur Entwicklung von EVnet-SW-Komponenten einzuhaltenden Vorschriften bereits während der Entwicklung von Algorithmen eingehalten werden müssen und dass bereits bewährte SW-Komponenten wieder genutzt werden können, um so die Integration in operationelle Systeme zu beschleunigen. So gehört zum operationellen EVnet System des IKN neben den HW Komponenten ein ganzes Portfolio von SW-Komponenten. Dazu gehören insbesondere Prozessoren und Module zur Dekodierung von GNSS-Daten, zur Prozessierung von GNSS-Daten auf der Grundlage verschiedener Algorithmen (Qualitätsbewertung und Navigation), zur Verschaltung von Prozessoren zu Prozessierungsketten sowie zur Unterstützung aller Entwicklungs- und Verifikationsschritte von Algorithmen im off-line-Modus.

Auf Grund dieser Eigenschaften erscheint die Nutzung von EVnet sowohl in thematischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht als geeignete Option zum Aufbau von lokalen Navigationsergänzungssystemen, insbesondere dem in ALEGRO aufzubauenden maritimen GBAS-System. Im Hinblick auf die relativ kurze Projektlaufzeit ist weiterhin von Vorteil, dass es die modulare und offenen EVnet-Architektur den Entwicklern von erforderlichen HW- als auch SW-Komponenten erlaubt, frühzeitig und systemnah zur Realisierung des Systems beizutragen und bereits bewährte EVnet-SW-Komponenten nutzen zu können.

Auf Grund der Tatsache, dass sich sowohl die EVnet-Masterstation (CPCF) als auch EVnet-Monitorstationen remote über HTML-Schnittstellen betreiben lassen, stellt eine räumliche Entfernung zwischen Entwicklern und den HW-Komponenten, sobald diese am Einsatzort installiert sind, keine wesentliche Einschränkung dar.

Für das Projekt ALEGRO war es erforderlich, die Struktur des mit weltweit verteilten Stationen arbeitenden EVnet-Systems des IKN auf die regionale Struktur eines GBAS Systems anzupassen. Zudem musste gewährleistet werden, dass eine eigenständige Prozessierungs- und Kommandierungseinheit zur Verfügung steht, um das GBAS System

eigenständig betreiben zu können. Unter Berücksichtigung der detaillierten Aufgabenstellung wurde die allgemeine EVnet-Struktur Abb. 4-36 auf die im Kapitel 4.3.1 dargestellte Architektur abgebildet.

Zur Anpassung der EVnet-Betriebssoftware an spezielle Anforderungen des Projektes ALEGRO wurde an die Firma DJO ein Unterauftrag vergeben, dessen Aufgaben darin bestanden,

- die Funktionalität der EVnet CPCF auf virtuellen Rechnern zu testen
- einen zusätzlichen Datenstrom zu generieren, der über das Vorhandensein aller verfügbaren Messdatenströme zu informiert
- die Archivfunktionalität so zu erweitern, dass es möglich wird, Daten echtzeitnah auf dem Archivserver für weiterführende Analysen zur Verfügung zu stellen
- den Archivzugriff so zu verändern, dass es Nutzern möglich ist, bereits von behindernden EVnet-spezifischen Informationen des hinterlegten Datenbanksystems befreite Daten per Download zu beziehen,
- die Möglichkeit zu schaffen, dass sich Datenströme von Sensoren an unterschiedliche CPCF Server übermitteln lassen.

Der letzte Punkt trägt dem Umstand Rechnung, dass die Entwicklung und Verifikation der ALEGRO Prozessoren unter Nutzung des EVnet des IKN in Neustrelitz erfolgen musste. Das EVnet-basierte GBAS-System war deshalb mit dem EVnet des IKN zu koppeln und dieses mit den Sensordaten des Rostocker GBAS-Bodensegments zu versorgen.

#### **4.3.4 Standortauswahl und –validierung**

Für den Aufbau des GBAS Bodensegments musste ein Standort im Hafen Rostock gefunden werden, der möglichst folgenden Anforderungen genügt:

1. Durch eine möglichst zentrale Lage im Bereich des Überseehafens sollten für verschiedenste Anwender des GBAS kurze Basislinienlängen zur Referenzstation gewährleistet werden.
2. Am Referenzstationsstandort (Antenne) sollte möglichst eine 360° optische Sichtbarkeit zu GNSS-Satelliten ab einem Elevationswinkel von 5° gewährleistet sein.
3. Im Umfeld des Referenzstandorts sollten sich keine aktiven Strahlelemente anderer Dienste befinden, um möglichst interferenzbedingte Signalstörungen ausschließen zu können.
4. Die Entfernung zwischen GNSS-Antenne und GNSS-Empfänger sollte möglichst weniger als 30 m betragen, um überproportional erhöhte Signaldämpfungen zu vermeiden bzw. alternativ auf den Einsatz zusätzlicher Verstärker verzichten zu können.
5. In den Räumlichkeiten des GBAS-Bodensegments mussten DSL-Anschlussmöglichkeiten vorhanden sein, um eine internetbasierte Vernetzung dieses Segments mit dem Nutzersegment als auch dem Entwicklungsstandort Neustrelitz abzusichern.
6. Eine möglichst separate Räumlichkeit für die Installation des Bodensegments wurde als wünschenswert eingestuft, um die Sicherheit der Technik zu gewährleisten und eine erhöhte Schallabstrahlung auf benachbarte Arbeitsplätze auszuschließen.

Auf Grundlage dieser Anforderungen wurde als Standort für das GBAS Bodensegment das Gebäude der Hafenentwicklungsgesellschaft in der Ost-West-Straße 12 (Raum 527) als



geeigneter Standort identifiziert. Dieser Standort erfüllt die Anforderungen 1, 3, 4, 5 und 6 zu 100 %. Bezüglich der Abschattungsfreiheit (Requ. 2) musste eine geringe Einschränkung in Kauf genommen werden. Diese bezieht sich darauf, dass sich im Azimutbereich von rund  $30^\circ$  bis  $35^\circ$  und einer Entfernung von ca. 150 m ein großes Silogebäude befindet, welches das Gebäude in der Ost-West-Straße um etwa das doppelte überragt. Bei einer Entfernung von 150 m werden bis  $5^\circ$  Elevation sichtbare Objekte abgeschirmt, insofern das abschirmende Objekt eine Höhendifferenz von rund +25 m aufweist. Insofern muss bei GNSS-Satelliten, die sich im Azimutwinkel von  $30^\circ$ - $35^\circ$  bzw. Elevationswinkel um  $5^\circ$  aufhalten davon ausgegangen werden, dass sie entweder abgeschirmt werden oder durch Signalreflexionen ein verstärkter Mehrwegefehler auftritt.

Die Lage des ALEGRO GBAS Bodensegments im Rostocker Hafen ist den nächsten 4 Grafiken zu entnehmen:



**Abb. 4-37 Lage des ALEGRO GBAS Bodensegments (ALEGRO Referenzstation GHRO) im Bereich des Rostocker Hafens**



**Abb. 4-38 Standort der GNSS-Antenne, des Wettersensors und der Funkantenne (Luftbildansicht)**



**Abb. 4-39 Standort der GNSS-Antenne, des Wettersensors und der Funkantenne (Gebäudeansicht)**

Die Antennen für den Empfang von GNSS-Signalen sowie die Ausstrahlung von Korrektursignalen sowie die Sensoren für die Aufzeichnung von Wetterdaten sind auf dem Dach des Gebäudes im Bereich des Fahrstuhlschachtes installiert. Im Hintergrund der rechten Grafik der nachfolgenden Abbildung ist der zuvor erwähnte Siloturm ersichtlich.



**Abb. 4-40 Außensensoren des GBAS Bodensegments**

In Anlehnung an die Namensvergabe von IGS Stationen wurde dem GBAS Bodensegment die ID

**GHRO**

zugewiesen<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> GHRO = **GBAS** Station **Hafen RO**stock



Als Referenzposition wurden für das GBAS Bodensegment (GHRO) folgende Koordinaten berechnet:

**Tab. 4-5 Geozentrische & kartesische Koordinaten des Antennenmesspunktes der ALEGRO Referenzstation (GHRO) in WGS 84**

Latitude	Longitude	Altitude
54° 8' 43.25783" N (54.1453493972523 °)	12° 06' 52.93070" E (12.1147029714545 °)	64.074 m
X [m]	Y [m]	Z [m]
3660767.565 m	785783.202 m	5146288.525 m

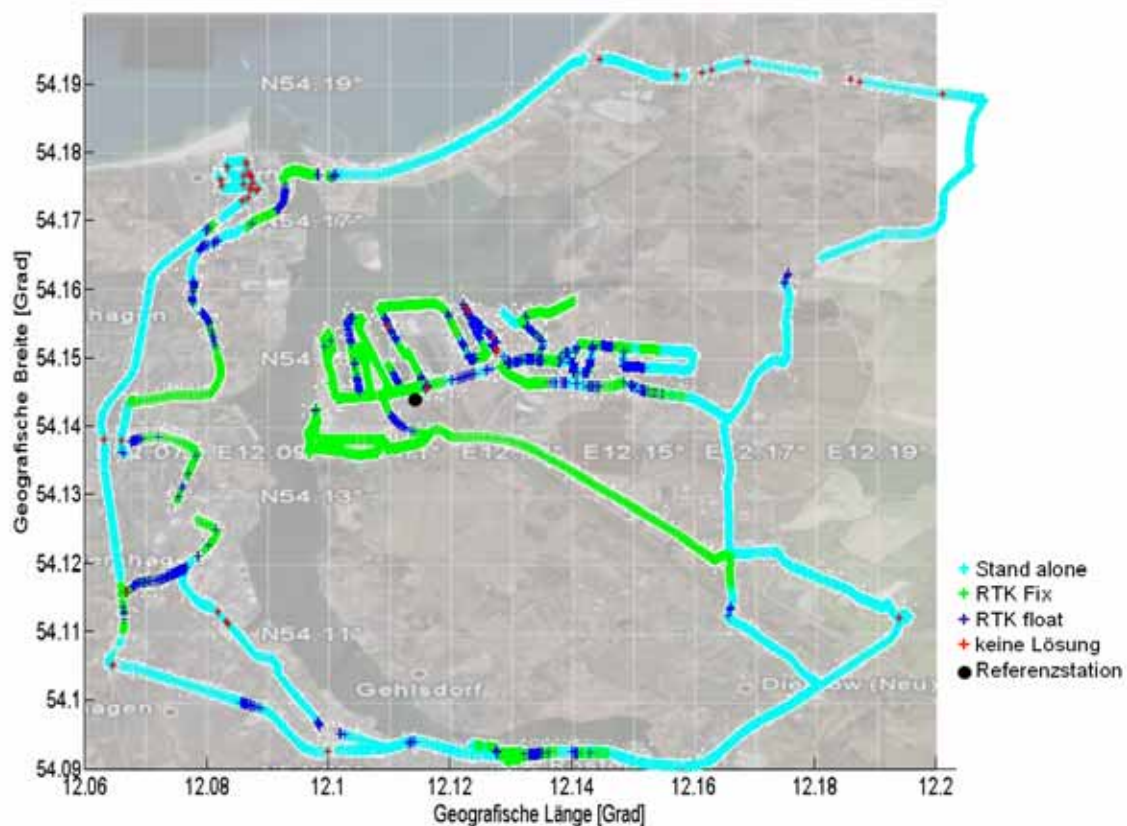
Die Bestimmung der Koordinaten des Referenzpunktes des GBAS Bodensegments beruht auf Grundlage von Messdaten der Station selbst sowie von Referenzdaten der IGS Station WARN (Warnemünde). Für die Ermittlung der Referenzposition wurde die Postprozessierungssoftware TTC (siehe auch Kap. 4.2.1 und unter <http://www.trimble.com/totalcontrol.html>) eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung zur Bestimmung der Referenzposition ist in [TN-P 7] zu finden.

Bereits während der Initialmesskampagne, bei der die Referenzstation noch am Pier 1 installiert war, konnte festgestellt werden, dass trotz dieses aus geodätischer und nachrichtentechnischer Sicht ungünstigen Standortes ein sehr guter Empfang von Korrektursignalen auf der Funkfrequenz von 433 MHz bis etwa 5 km gegeben war. Dieses Ergebnis, dass auf der Grundlage von Messfahrten des Forschungsschiffs „Prof. A. Penck“ abgeleitet wurde, ist damit nicht für Anwender im Hafenumschlagsbereich übernehmbar.

Bei der folgenden Messkampagne, die nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme des GBAS-Bodensegments an seinem endgültigen Standort stattfand, wurden folglich dynamische Messungen auf befahrbaren Wegen innerhalb als auch außerhalb des Rostocker Hafens durchgeführt. Als Kriterium für den Empfang von Korrektursignalen wurden die Informationen von GNSS-Empfängern benutzt. Diese können über ein spezielles Datenausgabeformat Auskunft darüber erteilen, ob die empfangenen Korrekturinformationen für eine verbesserte Positionierung auf Basis von RTK (fixed, float) nutzbar waren.

Im Ergebnis der Messkampagne (siehe Abb. 4-41) wurden die Positionsflags des verwendeten GNSS-Empfängers ausgewertet und die Art der Positionierung farblich codiert dargestellt. Von Interesse für den korrekten Empfang von Korrektursignalen sind dabei nur die grün (RTK fix) und dunkelblau (RTK float) gekennzeichneten Positionslösungen.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der Empfang von Korrektursignalen im Nahfeld des GBAS Bodensegments (1 bis 1,5 km) nahezu vollständig gewährleistet werden konnte. Bereits im Hafengebiet führen Abschirmungen durch Pipelines und Kräne dazu, dass die Qualität und Verfügbarkeit von GNSS-Signalen partiell eingeschränkt ist. Obwohl zu diesen Zeitpunkten der Empfang von Korrektursignalen nachgewiesen werden konnte, waren der eingesetzte Empfänger (kommerzielle Standardlösung) nicht jederzeit in der Lage, differentielle, phasenbasierte Positionslösung bereitzustellen. Diese Effekte treten auf, wenn an der Referenzstation und dem mobil genutzten Empfänger nicht mal für 4 Satelliten die Daten für eine differentielle Lösung mit ausreichender Qualität zur Verfügung stehen.



**Abb. 4-41 Art der von GNSS-Empfänger genutzten Positionslösungsmethode zur Kontrolle des Empfangs und der Nutzung von RTK Signalen**

Es wird aber als notwendig erachtet, weiterführende Untersuchungen und Analysen vergleichbarer Art vorzunehmen, um eine vertiefende Klassifikation der Fehlerursachen in Bezug auf das Gesamtergebnis zu erreichen und um statistisch repräsentative Ergebnisse bereitzustellen. Hier sollte insbesondere auch auf die verschiedenen Optionen der Korrekturdatenverteilung eingegangen werden. Auch wäre zu prüfen, inwieweit begleitende Interferenz- und Mehrwegemessungen diese Untersuchungen stützen könnten.

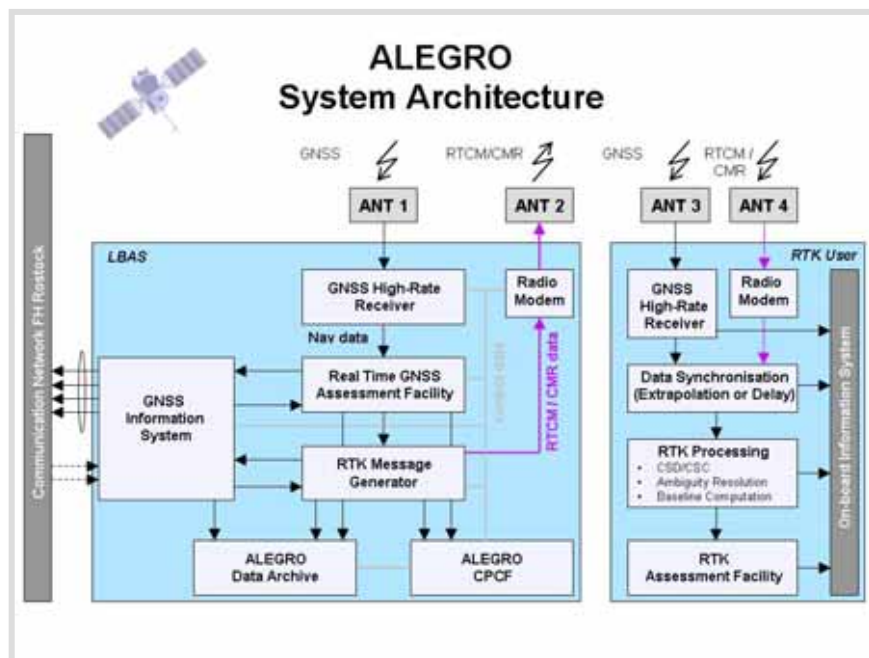
#### **4.4 Aufbau des experimentellen GBAS- Bodensystems**

Die Algorithmen- und Softwareentwicklung erfolgte unter Beachtung der beiden wesentlichen Aufgabenstellungen des GBAS-Bodensystems:

- Echtzeitmonitoring des GNSS und des GBAS basierend auf abzuleitenden Qualitätskenngrößen
- Bereitstellung der Ergänzungssignale und gegebenenfalls von Zusatzinformationen durch das GBAS-Bodensegment im RTCM 3.0 Format .

##### **4.4.1 Architekturkonzept**

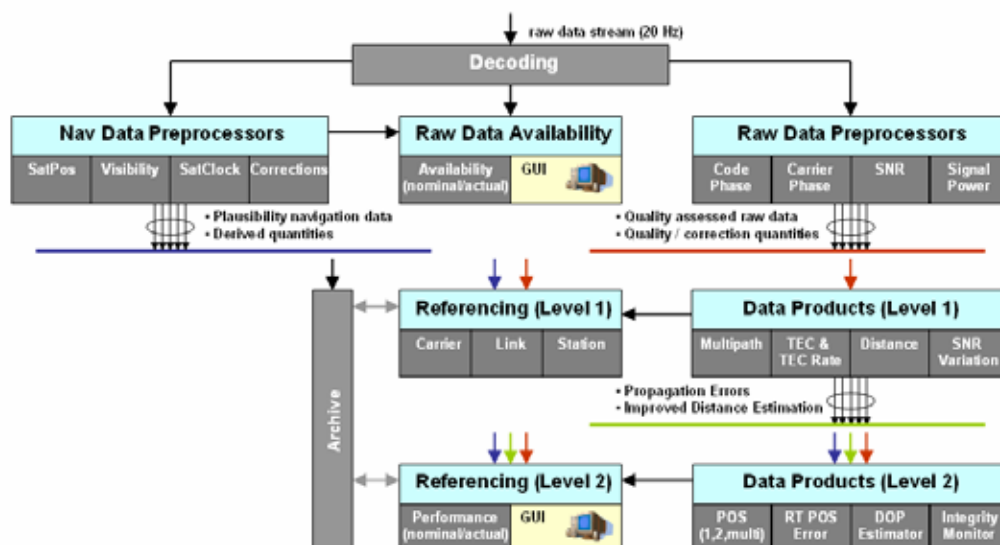
Ausgangspunkt für die Umsetzung beider Aufgabenstellung war das in Abb. 4-42 dargestellte Basiskonzept für das ALEGRO GBAS.



**Abb. 4-42 Basiskonzept zum Aufbau des ALEGRO GBAS inklusive Darstellung wesentlicher Datenprozessierungsfunktionen**

Das Echtzeitmonitoring des GNSS und des GBAS, dass durch Aufbau von Echtzeitprozessierungsketten und der Bereitstellung dafür geeigneter Algorithmen umzusetzen ist, bilden sich arbeitsteilig in den Modulen „Real Time GNSS Assessment Facility“ und „ALEGRO CPCF“ ab. Die Aufzeichnung und Archivierung von Rohdaten als auch abgeleiteten Datenprodukten durch das „ALEGRO Data Archive“ ist eine notwendige Servicefunktionalität. Für die Bereitstellung der RCTM 3.0 Korrekturen ist der „RTK Message Generator“ verantwortlich.

Das dem Echtzeitmonitoring zu Grunde gelegte Basiskonzept ist in Abb. 4-43 dargestellt. Der eingehende Datenstrom des Referenzstationsempfängers wird dekodiert und in Form von EVnet-internen Datenströmen zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt.



**Abb. 4-43 Basiskonzept für das GNSS- und GBAS-Echtzeitmonitoring**

Aus den Navigationsdaten werden navigationsrelevante Dateninhalte extrahiert und im Fall von ALEGRO vorrangig zur Bestimmung von Satellitenpositionen und von Satellitenuhrenkorrekturtermen mittels aufgabenspezifischer Servicemodule (EVnet SW-API) genutzt. Aus ihnen werden aber auch die Satelliten identifiziert, die in Bezug auf den Referenzstandort sichtbar sein sollten und für die folglich auch Rohdaten durch den Empfänger bereitgestellt werden müssten. Eine erste Gegenüberstellung von sichtbaren und verfügbaren Satelliten für die GBAS-Verarbeitung wird anhand real vorhandener Beobachtungsdaten vorgenommen. Liegen keinerlei Daten eines sichtbaren Satelliten vor, so sollte im Fall von GNSS-bedingten Ursachen der Satellit in den Navigationsdaten „unhealthy“ gesetzt sein oder ist anderenfalls als eine Abweichung vom Nominalverhalten zu interpretieren. Werden nur einige Daten durch den Empfänger bereitgestellt, so ist davon auszugehen, dass das betroffene Satellitensignal akquiriert oder reaquirit wird oder die Signalqualität derart gering ist, dass eine vollständige Signalauswertung durch den Empfänger nicht möglich war.

Die Bewertung der Beobachtungsgrößen erfolgt stufenweise:

- Rohdaten-Preprozessoren (siehe Kap. 4.4.4) werden genutzt, um jeden Datentyp pro Signalkomponente unabhängig von anderen zu analysieren. Obwohl die damit anwendbaren Lösungsansätze auf Zeitreihenanalysen und Datenfilterung beschränkt sind, wird damit eine Fehlerfortpflanzung oder auch Fehlerüberlagerung, wie sie bei einer kombinierten Datenprozessierung auftritt, vermieden. Diese Qualitätskenngrößen sind damit für weiterführende Korrelationsanalysen geeignet.
- Datenprodukte 1. Ordnung (siehe Kap. 4.4.5) sind auf die linkspezifische Bestimmung von Fehleranteilen durch kombinierte Nutzung verschiedenster Datentypen (ein- zwei- und mehrfrequenzbasierte Kombination von codebasierten und trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen) und u.U. nachfolgender Zeitreihenanalyse oder Filterung aufgebaut.
- Datenprodukte 2. Ordnung (siehe Kap. 4.4.6) beruhen auf der kombinierten Nutzung aller oder ausgewählter Daten von sichtbaren Satelliten, insofern die dafür notwendigen Beobachtungsgrößen verfügbar sind. Methodische Ansätze in diesem Kontext sind Positionsbestimmungsverfahren in ihrer Vielfalt (u.a. mit und ohne RAIM Funktionalitäten), die Bewertung des geometrisch bedingten Positionsfehlers als die Positionsfehlerabschätzung (Soll/Ist-Vergleich, statistisch basiert).

Die Identifikation oder Entwicklung geeigneter Algorithmen und die softwaretechnische Umsetzung waren ein Hauptarbeitsschwerpunkt im Projekt ALEGRO.

Da erst mit der Verfügbarkeit eines experimentellen GBAS die Wirksamkeit und damit auch die Nutzbarkeit einzelner Qualitätskenngrößen für eine anwendungsorientierte, abstrahierte Darstellung der GNSS- und GBAS-Leistungsfähigkeit gegeben sein wird, ist es sehr vorteilhaft, dass die genutzte Entwicklungs- und Validierungsplattform (siehe Kap. 4.3.3) durch modularen Aufbau und offenes Schnittstellendesign weiterhin Modularerweiterungen und –substitutionen als auch den Aufbau weiterer oder veränderter Datenprozessierungsketten zulässt. Die in allen 3 Stufen bestimmten Qualitätskenngrößen bilden aber auch die datentechnische Grundlage, um ein Integritätskonzept ähnlich dem IALA Beacon DGNSS vorab zu in das GBAS zu implementieren.

Dazu gehört einerseits die Plausibilitätsprüfung bereitgestellter Korrekturwerte und Ergänzungssignale anhand von nominalen Wertebereichsvorgaben. Ihre Bestimmung und weitestgehende automatische Auswertung ist bereits vorbereitet. Aus den technischen Randbedingungen heraus (Einempfängerkonzept) kann nur ein reduziertes „Local Integrity Monitoring“ aufgesetzt werden (siehe Anlage A), da ein unabhängiger Integritätsmonitoringsempfänger nicht finanzierbar war. Der in ALEGRO derzeit implementierte Integritätsmonitor nutzt dabei die an der Referenzstation gemessenen

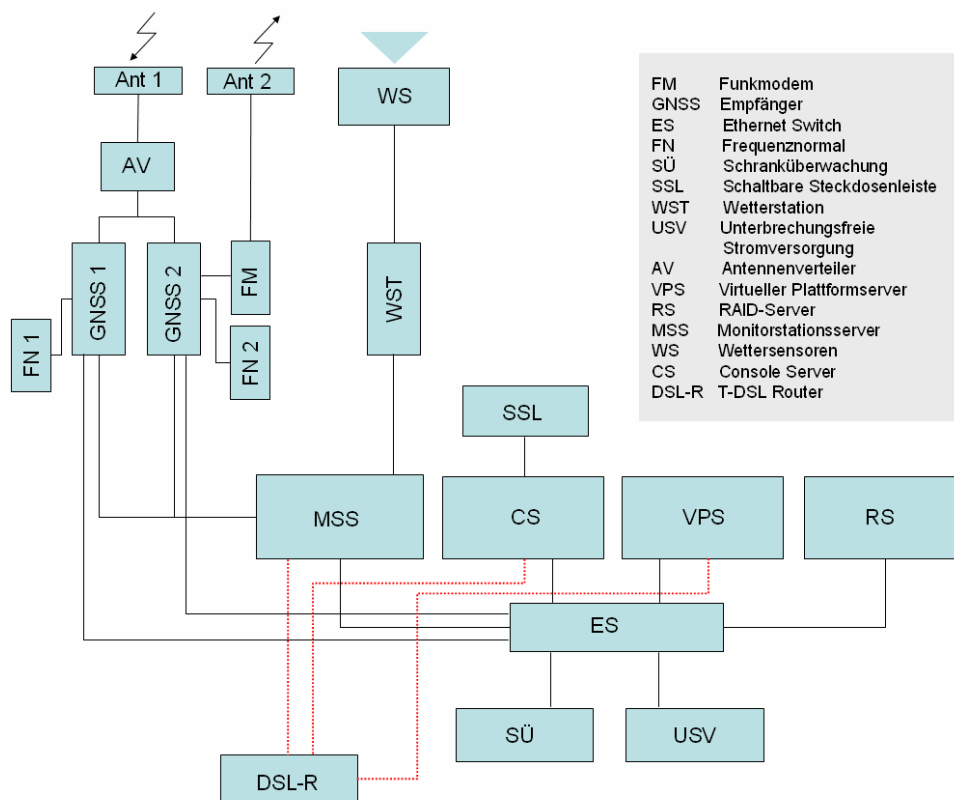
Beobachtungen und die daraus abgeleiteten RTCM-Korrekturdaten, um eine phasenbasierte DGNSS-Positionsbestimmung nachzuvollziehen. Aus dem Soll/Ist-Vergleich der so bestimmten Position werden dann die notwendigen Rückschlüsse bzgl. erreichter Genauigkeit und Verlässlichkeit RTK-basierter Positionsbestimmung gezogen.

Das SW-Konzept von ALEGRO ist bereits auf die integrative Nutzung von GNSS-Signalen zukünftiger Satellitennavigationssysteme wie GALILEO vorbereitet. Die Rohdaten-Preprozessoren sind so ausgelegt, dass keinerlei GNSS-spezifisches a-priori Wissen in den Verfahren genutzt wird. Damit wird das Spektrum bereitgestellter Ausgangsdaten nur durch die Verfügbarkeit an Eingangsdaten bestimmt. Module zur Datenproduktgenerierung 1. Ordnung sind derzeit auf Verfahren begrenzt, die auf einer ein- oder zweifrequenzbasierten Kombination der linkspezifischer Daten beruhen. Eine Portfolioerweiterung gerade in Bezug auf mehrfrequenzbasierte Verfahrensansätze ist thematischer Inhalt des geplanten Projekts IngMAR und entspricht effektiv einer Erweiterung der in ALEGRO dafür genutzten Module. Gleiches gilt für die Datenproduktgenerierung 2. Ordnung.

## 4.4.2 HW Aufbau

Der HW Aufbau des Bodensegments erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 4.3.2 getroffenen Komponentenauswahl unter Beachtung der Gesamtprojektzielstellung (siehe Kap. 4.1).

Die Verschaltung der HW Komponenten erfolgte entsprechend des in Abb. 4-44 dargestellten Blockschaltbildes des GBAS Bodensegments.



**Abb. 4-44 Prinzipielles Blockschaltbild zur HW Verschaltung des ALEGRO GBAS Bodensegments**

Die Komponenten Monitorstationsserver und Prozessierungsserver (in der Grafik wird dieser als VPS Server bezeichnet) bilden die strukturelle HW-Grundlage für alle entwickelten SW Produkte im Kontext der ALEGRO GNSS Performance Assessment Facility (A-GPAF). In

Abb. 4-45 ist die komplett aufgebaute GBAS Monitorstation zu sehen, die sich im Gebäude Ost-West-Straße 12 im Raum 527 befindet. Zusammen mit den Sensoren, die auf dem Dachbereich installiert sind (siehe dazu Abb. 4-40) bilden die HW Bestandteile das GBAS Bodensegment. Alle weiteren Details bzgl. des HW-Aufbaus des GBAS Bodensegments, einschließlich Netzanbindung und Netzstruktur sind umfassend in [TN-P 6] dargelegt.



**Abb. 4-45 GBAS Monitorstation**

#### **4.4.3 Betriebssteuerung und –überwachung**

Für den Betrieb sowie die Überwachung des ALEGRO GBAS Bodensegments sind im Wesentlichen die 4 Hardwarebestandteile Monitorstationsserver, Virtueller CPCF Server, RAID-Server und Console Server verantwortlich. Diese Server verfügen über genügend Leistungsfähigkeit, die ihnen obliegenden Aufgaben der Datenakquisition-, Verteilung- und Speicherung zu übernehmen und darüber hinaus auch als Prozessrechner für die in ALEGRO entwickelten Verfahren zur Überwachung von GNSS eingesetzt zu werden. Detailliert obliegen den Servern folgende Aufgaben:

**Tab. 4-6 Hauptbetriebskomponenten zur Steuerung und Überwachung des GBAS Bodensegments**

Typ / Name	Beschreibung
Monitorstationsserver	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Steuerung aller angeschlossenen Sensoren per GUI</li> <li>- Überwachung des USV per GUI</li> <li>- Überwachung des Serverschranks per GUI</li> <li>- Operator-Monitor für Client-Anwendungen und grafische Nutzerinterfaces zur Steuerung von A-GPAF Komponenten</li> </ul>
Virtueller Plattformserver (VPS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Steuerungsserver für virtuelle Maschinen</li> </ul>



Gateway / VPS-cpcfgw	- Virtuelle Maschine 1 → Verbindungsschnittstelle der CPCF
Admin Node / VPS-cpcfan	- Virtuelle Maschine 2 → Konfigurationsverwaltung und Nutzerverwaltung
Broadcaster / VPS-cpcfbc	- Virtuelle Maschine 3 → Bereitstellung und Verteilung von Datenströmen
Processing Node / VPS-cpcfp1	- Virtuelle Maschine 4 → Prozessrechnerumgebung für die Implementierung aller A-GPAF zugehörigen Prozessoren
Archive Node / VPS-cpcfar	- Virtuelle Maschine 5 → Archivierungssystem zur Datenablage von Prozessierungsergebnissen
RAID Server	- Langzeitarchivierungssystem zur Datenspeicherung von Rohdaten
Console Server	- Überwachung von HW Komponenten - Steuerung der Schaltbaren Steckdosenleiste

Über Remote Zugänge ist es dem ALEGRO Operator unter Nutzung bestimmter Zugangcodes möglich, sich auf der ALEGRO GBAS Monitorstation einzuloggen und alle darin laufenden Systeme (Server) zu monitoren bzw. zu konfigurieren.

Der Remote Zugang ist über die folgenden 4 Systeme möglich:

**Tab. 4-7 Remote Zugangsmöglichkeiten auf die ALEGRO Referenzstation**

System	Zugangsart(en)	Anwendungen
Monitorstationsserver	NX ssh	KDE Oberfläche Konsole
Virtueller Plattformserver VPS	ssh X-Window-System	Konsole spezielle Anwendung
cpcfgw (virtualisiertes System auf VPS)	ssh https	Konsole EVnet-Archiv
Console Server	ssh https	Konsole Konfiguration

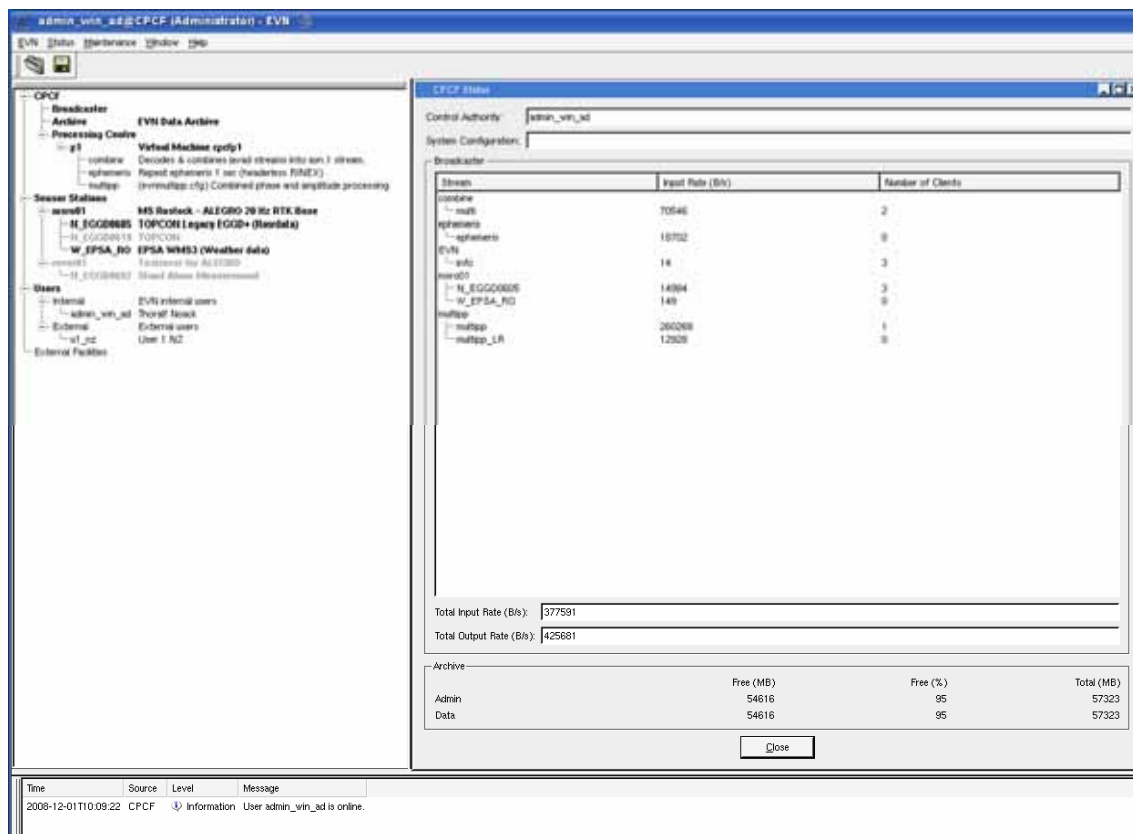
### **MONITORSTATIONSSERVER**

Auf dem Monitorstationsserver ist ein NX-Server installiert. Dieser ermöglicht den Remote Zugriff (auch betriebssystemübergreifend) durch NX-Clients von entfernten Systemen. Folgende Konfigurations- und Monitoringmechanismen lassen sich damit remote überwachen:

1. Start und Stopp des EVnet GUI zur Steuerung und Konfiguration von Sensoren und Prozessoren
2. Aufruf und Monitoring von GUI Anwendungen der A-GPAF
3. Überwachung der Knürr Schranküberwachung per Browser
4. Überwachung der USV per Browser
5. Überwachung des VPS per X-Window
6. Konfiguration des DSL-Routers per Browser

## 7. Konfiguration und Steuerung des Console Server per Browser

Die Steuerung und Überwachung von Sensoren der Monitoringstation sowie der Prozessoren des auf dem VPS laufenden Prozessierungssystems werden durch das grafische Nutzerinterface von EVnet übernommen. Zudem werden dort die Aufgaben der Nutzerverwaltung über Datenbankserversysteme sowie die Verteilung von Datenströmen zwischen der Monitorstation (Referenzstation) und der CPCF sowie zwischen der CPCF und Nutzern (Clients) geregelt. Letztlich wird EVnet auch zur Archivierung von Daten und zugehörigen Metadaten eingesetzt. Das dafür genutzte Operatorinterface ist in Abb. 4-46 dargestellt.



**Abb. 4-46 EVnet basiertes Operatorinterface zur Steuerung und zum Monitoring der Datenströme der Monitorstation sowie des Prozessierungssystems**

Die ALEGRO Monitorstation wird in EVnet unter dem Namen msro01 geführt. Im Menübaum auf der linken Seite sind die Sensoren der Station sowie die Prozessoren der CPCF ersichtlich. Das in der Mitte angezeigte Statusfenster dient dem Operator dazu, einen Überblick über alle aktuell verteilten Datenströme zu bekommen, die aktuelle Übertragungsrate des Datenstroms abzulesen sowie die Anzahl von Nutzern (Prozessen/Clients), die auf die Datenströme zugreifen, zu monitoren.

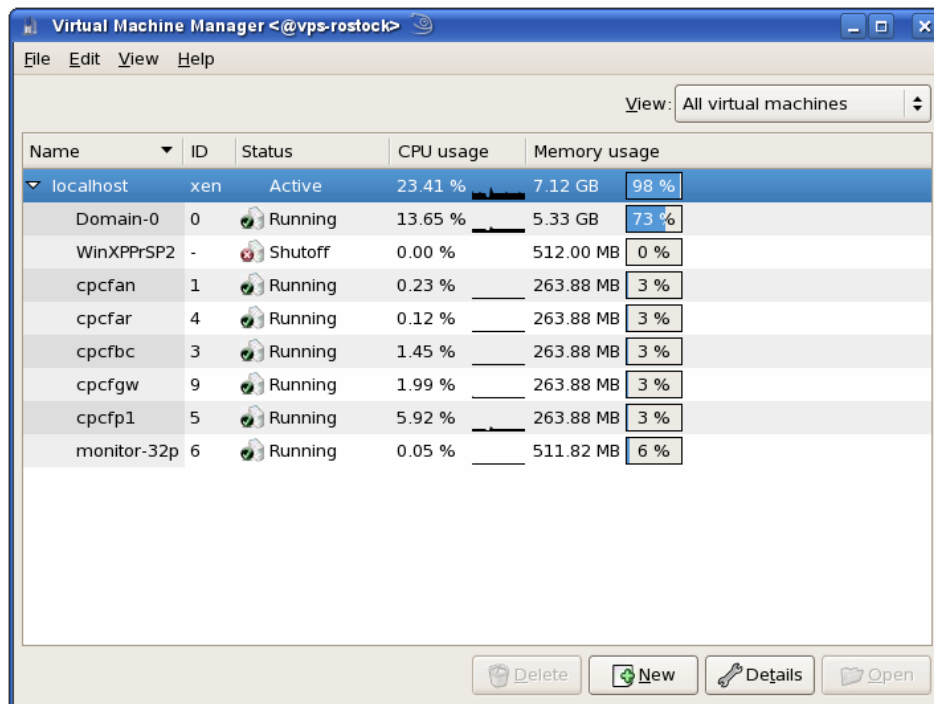
Dem Operator ist es durch einfachen Zugriff mittels Mausklicks auf die Sensoren möglich, diese entsprechend den jeweiligen Erfordernissen konfigurieren zu können. Für ALEGRO wurde die Sensorkonfiguration auf eine Rohdatenupdaterate von 20 Hz eingestellt. Die gesamte Konfiguration ist in script Files gespeichert und kann dadurch auch nach notwendigen Änderungen für Tests und Demonstrationen jederzeit an die konkreten Erfordernisse angepasst werden.



Mittels einer speziellen Nutzerverwaltung ist es möglich, Nutzern den Zugriff auf die EVnet basierten Datenströme des ALEGRO GBAS Bodensegments zu gewährleisten. Zu beachten ist dabei, dass zum Schutz gegen Angriffe aus dem Internet neben der Nutzerauthentifizierung und einem Passwort auch ein ssh-Schlüssel erforderlich ist.

### **VIRTUELLER PLATTFORMSERVER - VPS**

Die installierten Maschinen der EVnet CPCF auf dem virtuellen Plattformserver lassen sich mit Hilfe der nachfolgend dargestellten GUI konfigurieren, starten, überwachen und stoppen.



**Abb. 4-47 GUI (virt-manager) zum starten, überwachen, konfigurieren und steuern aller virtuellen Maschinen des virtuellen Plattformservers**

### **CONSOLE SERVER**

Zur Schaltung von Komponenten (Ein/Aus) sowie zur Analyse angeschlossener Hardware über serielle Ports im Falle von Hardwareproblemen wird der Console Server sowie die an ihn angeschlossene schaltbare Steckdosenleiste genutzt. Auf folgende HW-Komponenten wird über serielle Ports ein Zugang gewährt:

- Schaltbare Steckdosenleiste
- Monitorstationsserver
- VPS
- RAID-Server

Folgende Komponenten lassen sich ferngesteuert an- und ausschalten:

- Empfänger
- Frequenznormal(e)
- Antennenverteiler
- Monitor (Bildschirm)

- Wetterstation
- Monitorstationsserver
- RAID-Server
- virtueller Plattformserver
- Ethernet Switch

#### **4.4.4 SW-Entwicklung GNSS-Datenvorverarbeitung**

Wesentliche Aufgabe der umzusetzenden GNSS-Datenvorverarbeitung ist die Bestimmung von datentypspezifischen Qualitätskenngrößen sowie die Detektion von Ausreißern und Diskontinuitäten.

Prinzipiell stehen dafür Navigationsdaten (u.a. Keplerelemente zur Satellitenpositionsbestimmung, Satellitenuhrenkorrekturdaten, Systemstatusinformationen) und Beobachtungsdaten (Code- und phasenbasierte Entfernungsmessungen, Amplitudenmessungen, Signal-Rausch-Verhältnis) zur Verfügung. Da die Überwachung der Navigationsdaten zumindest zukünftig eine Aufgabe des GNSS-Systembetreibers im Kontext der zu gewährleistenden GNSS-Systemintegrität ist, konzentrierten sich die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Vorverarbeitung auf die Beobachtungsdaten. Für die codebasierte Entfernungsmessung gilt folgendes Messmodell

$$\rho_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n) = R_{\text{geo}}^{\text{isat}}(t_n) + c \cdot (dT^{\text{isat}}(t_n) - dt_{\text{irec}}(t_n)) + d_{\text{ion}}^{\text{isat}}(t_n) + dt_{\text{tro}}^{\text{isat}}(t_n) + m_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n) + e_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n) \quad \text{Gl. 4-1}$$

mit

- $\rho_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n)$  - Codebasierte Entfernungsmessung zwischen Satellit und Empfänger
- $dT^{\text{isat}}(t_n)$  - Satellitenuhrenfehler, für den Korrekturterme in den Navigationsdaten
- $dt_{\text{irec}}(t_n)$  - Empfängeruhrenfehler, der als 4. Unbekannte neben den 3 Koordinaten der Empfängerantenne während der Positionsbestimmung ermittelt wird
- $d_{\text{ion}}^{\text{isat}}(t_n)$  - Ionosphärisch bedingter Laufzeitfehler
- $dt_{\text{tro}}^{\text{isat}}(t_n)$  - Troposphärisch bedingter Laufzeitfehler
- $m_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n)$  - Laufzeitfehler der Mehrwegeausbreitung
- $e_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n)$  - Coderauschen.

Sie liefern eine fehlerbehaftete Absolutwertschätzung für die Distanz zwischen dem jeweiligen Satelliten und dem Antennenstandort des Messsystems. Im Fall von GPS stehen maximal die C/A- und P-codebasierten Entfernungsmessungen auf dem L1-Trägersignal und der P-Codebasierte Entfernungsmessung auf dem L2-Trägersignal zur Verfügung.

Für phasenbasierte Entfernungsmessungen gilt folgendes Messmodell

$$\phi_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda) = R_{\text{geo}}^{\text{isat}}(t_n) + c \cdot (dT^{\text{isat}}(t_n) - dt_{\text{irec}}(t_n)) - d_{\text{ion}}^{\text{isat}}(t_n) + dt_{\text{tro}}^{\text{isat}}(t_n) + \epsilon_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n) - \lambda \cdot N_{\text{irec}}^{\text{isat}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

mit

- $\varphi_{irec}^{isat}(t_n, \lambda)$  - Gemessene Phase
- $\varepsilon_{irec}^{isat}(t_n)$  - Phasenrauschen
- $\lambda \cdot N_{irec}^{isat}$  - Mehrdeutigkeitsterm als Produkt der signalspezifischen Wellenlänge  $\lambda$  und der Phasenunbestimmtheit (Mehrdeutigkeit)  $N_{irec}^{isat}$ , die im Idealfall während eines Satellitendurchgangs konstant ist.

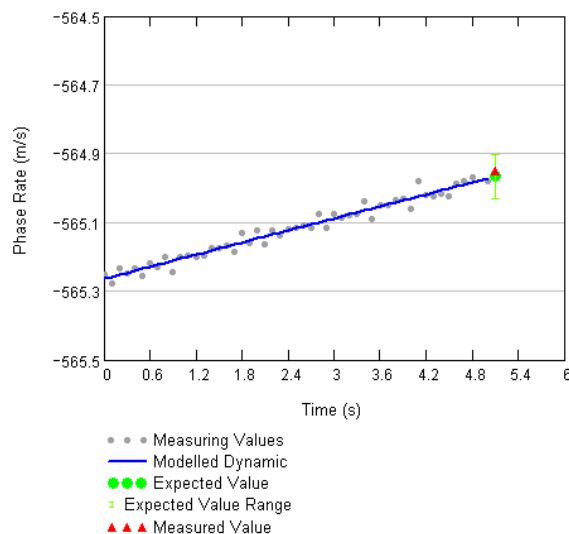
Sie liefern eine fehlerbehaftete Relativwertschätzung für die Distanz zwischen dem jeweiligen Satelliten und dem Antennenstandort des Messsystems in Folge des unbekannten Mehrdeutigkeitsterms.

Code- und phasenbasierte Entfernungsmessungen aller empfangenen GNSS-Signale bilden die datentechnische Grundlage, um eine Positionsbestimmung durchführen zu können. Ihnen gemeinsam ist, dass der Messwert als Summe des geometrischen Ranges und einer Vielzahl von Fehleranteilen bzw. Unbekannten ergibt. Im Idealfall, wenn alle Fehleranteile bekannt und damit korrigierbar wären, lässt sich der „wahre“ Antennenstandort exakt ermitteln

$$\hat{R}_{geo_{irec}}^{isat} = \sqrt{(X^{isat} - X_{irec})^2 + (Y^{isat} - Y_{irec})^2 + (Z^{isat} - Z_{irec})^2} + c \cdot dt_{irec}, \quad \text{Gl. 4-3}$$

wenn die geometrischen Ranges für mindestens 4 GNSS-Satelliten parallel zur Verfügung stehen und deren Position auch fehlerfrei aus den Navigationsdaten abgeleitet werden konnten. Neben den Entfernungsmessungen, den eigentlichen Messgrößen zur Positionsbestimmung, stehen zur Signalbewertung ergänzende Messwerte wie das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) oder Amplitudenwerte (A) der Signale zur Verfügung. Diese selbst sind als weiterführende Indikatoren für die Signalqualität und damit auch für die Qualität der Entfernungsmessungen nutzbar.

Indem die GNSS-Datenvorverarbeitung für jeden Datentyp separat, also unabhängig von anderen Datentypen, durchgeführt wird, wird eine Fehlerfortpflanzung und Fehlerüberlagerung bewusst vermieden. Damit ist aber auch das Analysepotenzial der Datenpreprozessierung, wie bereits zum Beginn des Kapitels ausgeführt, auf die Bereitstellung erster datentypspezifischer Qualitätskenngrößen sowie auf die Detektion von Ausreißern und Diskontinuitäten limitiert. Der verfahrenstechnische Ansatz aller datenspezifischen Preprozessierungen beruht auf der Zeitreihenanalyse einer kurzen Sequenz von aufeinander folgenden Daten, um daraus das für diesen Zeitraum gültige dynamische Verhalten zu modellieren und Abweichungen von diesem als Rauschen zu beschreiben. Aus dem dynamischen Verhalten kann auch der Erwartungswert für den nächsten eingehenden Messwert abgeleitet werden, wobei die Differenz zwischen beiden als Indikator für die Detektion von Unstetigkeiten genutzt wird. Das angewandte Verfahrensprinzip ist in Abb. 4-48 beispielhaft für die Phasenpreprozessierung dargestellt. Liegt folglich die Differenz zwischen Erwartungswert und Messwert im Wertebereich des Rauschens, so kann von einem stetigen Messsignal ausgegangen. Dies wäre in diesem Beispiel gegeben. Würde der Messwert außerhalb des erlaubten Wertebereiches liegen, so wird je nach gewählter Betriebsart dieser Messwert von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen oder er wird um die geschätzte Unstetigkeit korrigiert.



**Abb. 4-48 Verfahrensprinzip 1 bei der Rohdatenpreprozessierung am Beispiel der Phasenrate**

Unstetigkeiten bei codebasierten Entfernungsmessungen entstehen in Folge von Rücksetzoperationen des Empfängeruhrenfehlers und sind bei den meisten Empfängern in der Größenordnung von 1 ms. Bei trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen sind Unstetigkeiten im zeitlichen Phasenverlauf eine Folge von Rücksetzoperationen des Empfängeruhrenfehlers oder von Phasensprüngen, die aus der mangelnden Nachführbarkeit des Phasenregelkreises (PLL) bei geringerer Signalqualität oder erhöhter Signaldynamik entstehen. Detektierte Unstetigkeiten in den Amplitudenmessungen sind physikalisch gesehen nicht möglich und eher als ein technisches Problem während der Amplitudenbestimmung und der Messwertbereitstellung des eingesetzten Empfängers zu interpretieren.

Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist an 2 Bedingungen gekoppelt. Einerseits ist eine hochratige Messwertbereitstellung ( $> 10$  Hz) erforderlich, um über eine ausreichende Messwertanzahl in möglichst kurzen Zeiträumen zu verfügen, für die das dynamische Verhalten durch Polynome mit möglichst geringer Ordnung beschreibbar ist. Andererseits ist dieser Verfahrensansatz nur für solche Messwerte anwendbar, bei denen die numerische Quantisierung der Messwerte infolge des unterstützten Datenausgabeformats eine Reproduktion der eigentlichen Messwertdynamik erlaubt. Beide Bedingungen sind für code- und trägerphasenbasierte Entfernungsmessungen und auch im Fall von Amplitudenmessungen zumindest bei den in ALEGRO eingesetzten Empfängern erfüllt. Durch die eingesetzten Empfänger sind jedoch die SNR-Messwerte derart grob quantifiziert, dass mit einer Kurzzeitanalyse über einige Sekunden die SNR-Dynamik nicht abgeleitet werden kann und die Standardabweichung des Kurzzeitrauschens effektiv dem Quantifizierungsrauschen entspricht. Um dies zu umgehen, wurde ein alternativer Verfahrensansatz gewählt, der einerseits die Analysedauer in den Minutenbereich verlagert und statistische Kenngrößen (Mittelwert und Standardabweichungen) direkt zur Signalqualitätsbewertung heranzieht. Dafür notwendige Referenzwerte werden satellitenspezifisch und in Bezug auf die Phasenrate verwaltet und aus den Messungen des Vortages abgeleitet.

Im Rahmen der Preprozessorentwicklung wurden folgende Prozessoren softwaretechnisch umgesetzt und in die A-GPAF integriert:

- Range-Preprozessor

- Trägerphasen-Preprozessor
- Amplituden-Preprozessor
- SNR-Preprozessor.

Diese werden im Folgenden anhand ihrer Aufgabe, den Eingangs- und Ausgangsdaten, wählbarer Konfigurationsparameter, einer Kurzbeschreibung ihrer Funktionsweise sowie repräsentativer Ergebnisse zusammenfassend beschrieben.

#### **4.4.4.1 Range-Preprozessor**

##### **AUFGABE:**

Der Range-Preprozessor dient zur Bewertung der Plausibilität eingehender codebasierter Entfernungsmessungen, der Detektion und Korrektur von Rücksetzoperationen des Empfängeruhrenfehlers und der Bestimmung des Coderauschens aus der Zeitreihenanalyse.

Für die Umsetzung der Aufgabenstellung war neben der Algorithmenentwicklung und SW-umsetzung auch die Durchführung von Basisuntersuchungen notwendig, die die Eignung des Verfahrensansatzes auf codebasierte Entfernungsmessungen und die Optimierung der Konfigurationsparameter zum Inhalt hatten.

##### **EINGANGSDATEN:**

Der Prozessor arbeitet in der EVnet-Umgebung und nutzt die dort vorhandenen Datenströme, welche GNSS-Beobachtungen verschiedenster Art enthalten. Durch ihn werden nur die Beobachtungsgrößen vom Typ codebasierte Entfernungsmessungen verarbeitet, wobei die Verarbeitung je Codetyp und Satellitensignal unabhängig voneinander erfolgt.

##### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden 4 verschiedene Datenströme pro satellitenspezifischen, codebasierten Datentyp erzeugt, deren Bedeutung und Kennung in folgender Tabelle spezifiziert ist:

**Tab. 4-8 Ausgangsdaten des Range-Preprozessors**

	<b>Kennung</b>	<b>Dateninhalt</b>
1.	,m'	Korrigierter Range inklusive flagbasierte Attribute
2.	,n'	Coderauschen inklusive flagbasierte Attribute
3.	,o'	Kurzzeitstandardabweichung des Coderauschens inklusive flagbasierte Attribute
4.	,z'	Anzahl der Uhrenkorrekturen inklusive flagbasierte Attribute

Diese Ausgangsdaten stehen darauf aufbauenden Prozessoren bei der weiteren Datenverarbeitung in Echtzeit zur Verfügung, wobei die flagbasierten Attribute einerseits die Attribute der zugeordneten Eingangsdaten (ObsCode, SvCode) vererben und zusätzlich den Status der Prozessierung (in Akquisition, verwendbar, wenn plausibel und u.U. korrigiert) charakterisieren.

##### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

- Länge des Interpolationspolynoms
- Ordnung des Interpolationspolynoms

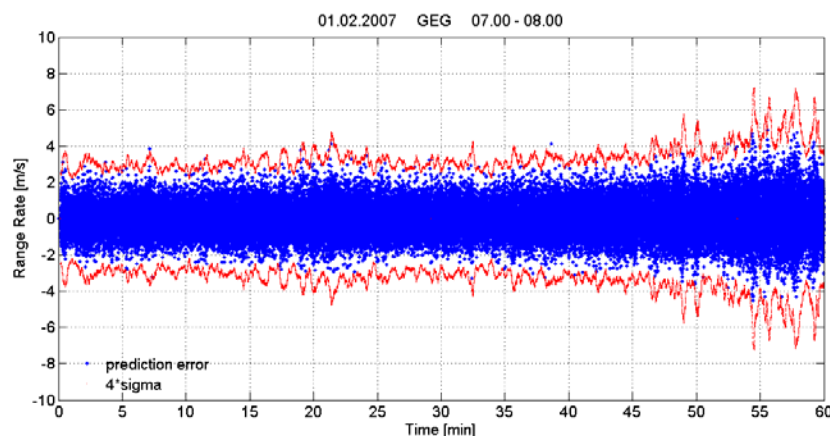
- Inverse Samplingfrequenz des eingehenden Datenstroms
- Minimale Anzahl an Samples, die für Interpolation vorhanden sein müssen

#### **FUNKTIONSWEISE:**

Die Plausibilitätsbewertung der codebasierten Entfernungsmessungen (Ranges) sowie die Schätzung des Code-Rauschens basiert auf dem bereits generisch beschriebenen Verfahrensansatz. Eine Sequenz aufeinander folgender Ranges wird genutzt, um daraus eine Sequenz von Range-Rate zu berechnen. Ihr Zeitverhalten wird durch ein Polynom spezifizierter Ordnung modelliert, wobei die Abweichung zwischen gemessenen und modellierten Range-Raten zur Bestimmung der Kurzzeitstandardabweichung des Coderausachens genutzt wird. Der Erwartungswert des nächsten Messwerts wird mit Hilfe des aktuellen Polynoms prädiziert. Die Differenz zwischen Erwartungswert und Messwert der Range-Rate ist ein Maß für das momentane Coderausachen, wenn keine Unstetigkeit im Zeitverhalten der codebasierten Entfernungsmessungen vorliegt. Da die Differenz als normal verteilt angenommen wird, sollte eine aktuell berechnete, plausible Differenz zwischen geschätzter Rate (Polynomwert) und tatsächlich berechneter Rate innerhalb der 4-Sigma-Grenze der Kurzzeitstandardabweichung liegen. Überschreitet die Differenz diese Grenze, wird auf einen 1-ms-Uhrensprung getestet. Der eingehende Range wird um diesen Wert korrigiert und die Differenz der neu berechneten Rate und dem Schätzwert sollte dann innerhalb der 4-Sigma-Grenze liegen. Ist dies der Fall, wird der Range-Wert in kommende Berechnungen einbezogen, andernfalls ausgeschlossen. Der erreichte Status des Prozessierungsergebnisses wird durch Setzen von Flags spezifiziert. Detailliertere Ausführungen zum Algorithmus des Range-Preprozessors und seiner softwaretechnischen Umsetzung sind in [TN-E 5] enthalten.

#### **VALDIERUNGSBEISPIEL:**

In Abb. 4-49 ist ein repräsentatives Prozessierungsergebnis dargestellt.



**Abb. 4-49 Coderausachen und 4-Sigma-Grenze, PRN2, 01.02.2007, GEG, 7-8 Uhr, C/A-Code**

Mit „prediction error“ wird die Differenz zwischen Erwartungswert und Messwert der Range-Rate dargestellt (blau). Die roten Hüllkurven charakterisieren den permanent neu bestimmten  $4\sigma$ -Wertebereich des Kurzzeitcoderausachens. Aus der Gegenüberstellung ist erkennbar, dass sowohl der genutzte Verfahrensansatz als auch die gewählten Konfigurationsparameter geeignet sind, durch Uhrenrücksetzoperationen entstehende Unstetigkeiten (1 ms entspricht rund einem Sprung von 300 m/s bei einer Samplingfrequenz von 1 Hz) nicht nur zu erkennen, sondern auch zu korrigieren. Über ein 24-h-Analyseintervall

werden mit dieser Einstellung nur wenige Ausreißer detektiert (siehe Tab. 4-9), die nicht durch eine Korrektur der Uhrenrücksetzoperation kompensierbar waren:

**Tab. 4-9 Anzahl an nicht erklärbaren Ausreißern, 24-h-Aufzeichnung, Basisstation, 01.02.2007**

Code	Anzahl Ausreißer (Flag 3) [%]
C L1	0.03
P L1	0.21
P L2	0.23

Obwohl bei der a-priori vorausgesetzten Normalverteilung des Coderausgangs alle Werte mit einer 100%-igen Wahrscheinlichkeit im  $4\sigma$ -Wertebereich liegen sollten, sind auch in Abb. 4-49 Messzeitpunkte erkennbar (z.B. in der 38 Minute), bei denen eine Wertebereichsverletzung detektiert wurde und der Messwert folglich von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen wurde. Dies ist der Tatsache gezollt, dass in dem so bestimmten Coderausgang auch höherfrequente Fehleranteile anderer Fehlerquellen (z.B. Uhren, Ionosphäre) enthalten sein können. Mit einer leichten Erhöhung der Wertebereichsgrenzen können jedoch solche Effekte weitestgehend kompensiert werden.

#### **4.4.4.2 Phasen-Preprozessor**

##### **AUFGABE:**

Der Phasen-Preprozessor dient zur Bewertung der Plausibilität eingehender trägerphasenbasierter Entfernungsmessungen, der Detektion und Korrektur von Rücksetzoperationen des Empfängeruhrenfehlers und von Cycle Slips und der Bestimmung des Phasenrauschens aus der Zeitreihenanalyse.

Bei der Umsetzung der Aufgabenstellung konnte auf eine im Rahmen des DLR-internen Projekts GalileoNav entstandene Vorlaufentwicklung zurückgegriffen werden, die im Rahmen von ALEGRO noch als Echtzeitprozessor softwaretechnisch umzusetzen und in das ALEGRO-Prozessierungssystem zu implementieren war.

##### **EINGANGSDATEN:**

Der Prozessor arbeitet in der EVnet-Umgebung und nutzt die dort vorhandenen Datenströme, welche GNSS-Beobachtungen verschiedenster Art enthalten. Durch ihn werden nur die Beobachtungsgrößen vom Typ phasenbasierte Entfernungsmessungen verarbeitet, wobei die Verarbeitung je Phasentyp und Satellitensignal unabhängig voneinander erfolgt.

##### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden 3 verschiedene Datenströme pro satellitenspezifischen, trägerphasenbasierten Datentyp erzeugt, deren Bedeutung und Kennung in folgender Tabelle spezifiziert ist:

**Tab. 4-10 Ausgangsdaten des Phasen-Preprozessors**

	Kennung	Dateninhalt
1	„M“	Qualitätsbewertete und korrigierte Trägerphase inklusive flagbasierte Attribute
2	„N“	Phasenrauschen inklusive flagbasierte Attribute
3	„O“	Kurzzeitstandardabweichung des Coderausgangs inklusive flagbasierte Attribute

Diese Ausgangsdaten stehen darauf aufbauenden Prozessoren bei der weiteren Datenverarbeitung in Echtzeit zur Verfügung, wobei die flagbasierten Attribute einerseits die Attribute der zugeordneten Eingangsdaten (ObsCode, SvCode) vererben und zusätzlich den Status der Prozessierung (in Akquisition, verwendbar, wenn plausibel und u.U. korrigiert) charakterisieren.

**KONFIGURATIONSPARAMETER:**

- Länge des Interpolationspolynoms
- Ordnung des Interpolationspolynoms
- Inverse Samplingfrequenz des eingehenden Datenstroms
- Betriebsart (Cycle Slip Korrektur an/aus)
- Typ der Cycle Slip Korrektur (integer/float)
- Schwellwert für Cycle Slip Detektion

**FUNKTIONSWEISE:**

Eine Sequenz aufeinander folgender Trägerphasenwerte wird genutzt, um daraus eine Sequenz von Phasen-Raten zu berechnen. Ihr Zeitverhalten wird durch ein Polynom spezifizierter Ordnung modelliert, wobei die Abweichung zwischen gemessenen und modellierten Phasen-Raten zur Bestimmung der Kurzzeitstandardabweichung des Phasenrauschens genutzt wird. Der Erwartungswert des nächsten Messwerts wird mit Hilfe des aktuellen Polynoms prädiziert. Die Differenz zwischen Erwartungswert und Messwert der Phasen-Rate ist ein Maß für das momentane Phasenrauschen, wenn keine Unstetigkeit im Zeitverhalten der trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen vorliegt. Da die Differenz als normal verteilt angenommen wird, sollte eine aktuell berechnete, plausible Differenz zwischen geschätzter Rate (Polynomwert) und tatsächlich berechneter Rate innerhalb der 4-Sigma-Grenze der Kurzzeitstandardabweichung liegen. Überschreitet die Differenz diese Grenze, wird anhand der Größe der Differenz entschieden, ob es sich um eine Unstetigkeit in Folge einer Uhrenrücksetzoperation handeln kann. Ist dies der Fall, wo wird der Phasenwert, seine Rate und die Differenz zwischen Erwartungs- und Messwert korrigiert. Liegt die Differenz immer noch außerhalb des tolerierbaren Wertebereiches, so wird im Fall einer nicht aktivierten Cycle Slip Korrektur der Phasenwert als nicht verwendbar gekennzeichnet. Im Fall einer Cycle Slip Korrektur wird die Änderung des Mehrdeutigkeitsterms bestimmt und damit der korrigierte Phasenwert gebildet. Der erreichte Status des Prozessierungsergebnisses wird durch Setzen von Flags spezifiziert. Detailliertere Ausführungen zum Algorithmus des Phasen-Preprozessors und seiner softwaretechnischen Umsetzung sind in [TN-E 11] enthalten. Für dieses Verfahren hält das DLR ein Patent [102006012797.8-35; 07005385.5].

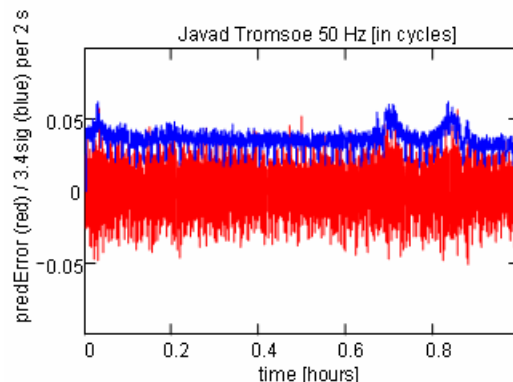
**VALDIERUNGSBEISPIEL:**

In Abb. 4-50 ist ein repräsentatives Prozessierungsergebnis dargestellt. Um zu belegen, dass dieses Verfahren auch robust beim Auftreten ionosphärische Störungen ist, wurde das Beispiel anhand von in Tromsø gemessenen Rohdaten während eines Ionosphärensturms generiert.

Obwohl bei der a-priori vorausgesetzten Normaverteilung des Coderausgangs alle Werte mit einer 100%-igen Wahrscheinlichkeit im  $4\sigma$ -Wertebereich liegen sollten, sind auch in Abb. 4-50 Messzeitpunkte erkennbar (z.B. nach einer halben Stunde), bei denen eine Wertebereichsverletzung detektiert wurde und der Messwert folglich von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen würde, insofern keine Cycle Slip Korrektur aktiviert ist. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass in dem so bestimmten Phasenrauschen auch höherfrequente

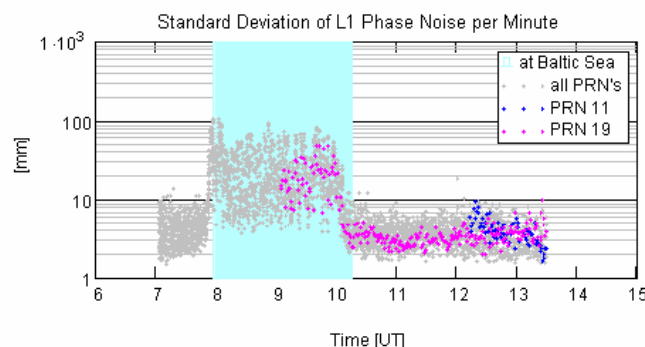


Fehleranteile anderer Fehlerquellen (z.B. Uhren, Ionosphäre) enthalten sein können. Mit einer leichten Erhöhung der Wertebereichsgrenzen können jedoch solche Effekte auch hier weitestgehend kompensiert werden.



**Abb. 4-50 L1-Phasenrauschen normiert auf den 4-fachen Wert der Kurzzeitstandardabweichung, PRN11 31.10.2003, Tromsøe**

Der Vorteil dieses Verfahrens ist insbesondere bei mobilen, maritimen Anwendungen erkennbar. In Abb. 4-51 ist die pro Minute ermittelte Standardabweichung des in Echtzeit bestimmten Phasenrauschens aller Satelliten und der PRN 11 und 19 dargestellt.



**Abb. 4-51 Standardabweichung des in Echtzeit bestimmten Phasenrauschens an Bord des Forschungsschiffs „Prof. A. Penck“**

Ein hier beobachtetes „erhöhtes Phasenrauschen“ resultiert aus der Schiffs- und Mastbewegung bei Windstärke 8 auf der Ostsee. Bei Nutzung von fixen Entscheidungspegeln zur Cycle Slip Detektion würden solche Werte eine gehäufte Detektion von Cycle Slips zur Folge haben. Dies kann jedoch vermieden werden, wenn Entscheidungspegel selbst situationsbezogen in Echtzeit bestimmt werden.

#### **4.4.4.3 Amplituden-Preprozessor**

##### **AUFGABE:**

Der Amplituden-Preprozessor dient zur Bewertung der Plausibilität der Amplituden bzw. Leistungen eingehender GNSS-Signale, der Detektion von Ausreißern und der Bestimmung des Leistungsrauschens aus der Zeitreihenanalyse. Da die Amplitude von Signalen ein guter Indikator zur Erkennung von ionosphärischen Szintillationen ist, werden durch diesen

Prozessor noch weiterführend ionosphärische Qualitätskenngrößen, z.B. der Szintillationsindex S4, bereitgestellt.

Bei der Umsetzung der Aufgabenstellung konnte auf eine im Rahmen des DLR-internen Projekts GalileoNav entstandene Vorlaufentwicklung zurückgegriffen werden, die im Rahmen von ALEGRO noch als Echtzeitprozessor softwaretechnisch umzusetzen und in das ALEGRO-Prozessierungssystem zu implementieren war.

#### **EINGANGSDATEN:**

Der Prozessor arbeitet in der EVnet-Umgebung und nutzt die dort vorhandenen Datenströme, welche GNSS-Beobachtungen verschiedenster Art enthalten. Amplitudenwerte von GNSS-Signalen sind jedoch keine Standardausgabe kommerziell verfügbarer Empfänger. Dieser Modul ist folglich nur einsetzbar, wenn GNSS-Empfänger mit einer speziellen Firmware ausgestattet sind, die Amplitudenwerte für die Inphase- und Quadraturkomponenten der empfangenen GNSS-Signale messen und bereitstellen. Der Prozessor verarbeitet die Amplitudenwerte pro Signalkomponente unabhängig von anderen, parallel bestimmten Amplituden.

#### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden 8 verschiedene Datenströme pro satelliten- und komponentenspezifischen Amplitudenwert erzeugt, deren Bedeutung und Kennung in folgender Tabelle spezifiziert ist:

**Tab. 4-11 Ausgangsdaten des Amplituden-Preprozessors**

	<b>Kennung</b>	<b>Dateninhalt</b>
1	,E'	Qualitätsbewertete Amplitude inklusive flagbasierte Attribute
2	,H'	Leistungsrauschen inklusive flagbasierte Attribute
3	,G'	Kurzzeitstandardabweichung des Leistungsrauschens
4	,F'	Normiertes Leistungsrauschen inklusive flagbasierte Attribute
5	char ( 0x7b )	S4-Index
6	char ( 0x7c )	Szintillationswahrscheinlichkeit
7	char ( 0x7d )	Mittelwert der S4-Indices
8	char ( 0x7e )	Mittelwert der erhöhten S4-Indices

Diese Ausgangsdaten stehen nach geschalteten Prozessoren bei der weiteren Datenverarbeitung in Echtzeit zur Verfügung, wobei die Ausgangsdaten einerseits Attribute der zugeordneten Eingangsdaten (ObsCode, SvCode) erben und zusätzlich den Status der Prozessierung (in Akquisition, verwendbar, wenn plausibel und u.U. korrigiert) erhalten. Bei den Ausgabewerten ist zu beachten, dass sie impliziert durch ihre jeweilige Bildungsvorschrift mit unterschiedlichem Update bereitgestellt werden,

#### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

- Länge des zur Regression genutzten Interpolationspolynoms
- Ordnung des zur Regression genutzten Interpolationspolynoms
- Inverse Samplingfrequenz des eingehenden Datenstroms
- Länge des Datensegments zur Berechnung der S4-Indices

- Länge des Datensegments zur Berechnung der Szintillationswahrscheinlichkeit und der Mittelwerte der S4-Indices

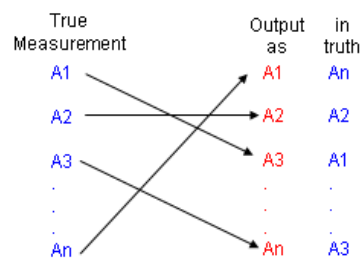
#### **FUNKTIONSWEISE:**

Die Pre-Prozessierung der Amplitudenwerte beruht ebenfalls auf dem bereits generisch beschriebenen Verfahrensansatz. Jedoch wird dieses auf die aus den Amplitudenwerten abgeleitete Leistung angewendet.

$$P[\text{dB}] = 10 \lg \left( \frac{A^2}{2} \right). \quad \text{Gl. 4-4}$$

Damit wird auch umgangen, dass die Anwendung dieses Verfahrens instabil werden kann, wenn die Zahlenwerte der dafür genutzten Einzelmessungen zu groß sind.

Eine Sequenz aufeinander folgender Leistungswerte wird genutzt, um ihr Zeitverhalten durch ein Polynom spezifizierter Ordnung zu modellieren und aus der Abweichung zwischen gemessenen und modellierten Leistungswerten die Kurzzeitstandardabweichung zu bestimmen. Der Erwartungswert des nächsten Messwerts wird mit Hilfe des aktuellen Polynoms prädiziert. Die Differenz zwischen Erwartungswert und Messwert der Leistung ist ein Maß für das momentane Leistungsrauschen, wenn keine Unstetigkeit im Zeitverhalten der Leistungswerte vorliegt. Liegt die Differenz innerhalb des durch die Kurzzeitstandardabweichung beschriebenen Wertebereiches, so wird der Leistungswert als plausibel eingestuft. Liegt er außerhalb, so ist von einem technisch bedingten Ausreißer auszugehen, dessen Ursache in der empfängerinternen Datenbestimmung oder Datenbereitstellung liegen kann. So ist es z.B. bekannt, dass zu Messzeitpunkten, bei denen ein erhöhter Bedarf an die Prozessorleistung des Empfängers besteht, Instabilitäten bei der Datenausgabe (Kontinuität und Zuordnung der Messwerte (Permutation siehe Abb. 4-52) auftreten können.



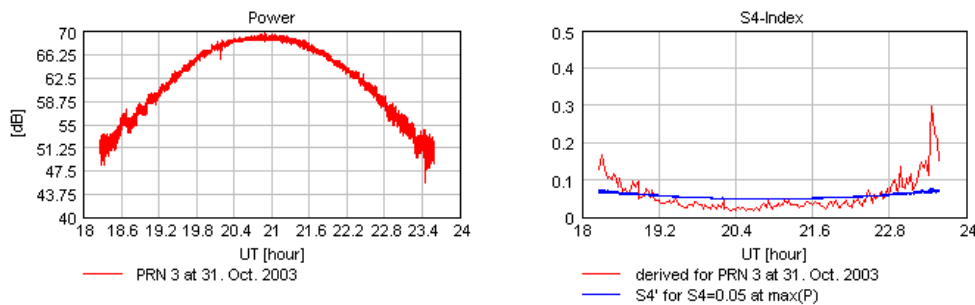
**Abb. 4-52 Permutierte Datenausgabe**

Die für die Ionosphärenforschung interessante Qualitätskenngröße S4-Index wird aus den Amplituden wie folgt direkt abgeleitet

$$S4_k = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (P_{i+k \cdot N} - \text{mean}\{P_k\})^2}}{\text{mean}(P)} \quad \text{mit} \quad \text{mean}\{P_k\} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} P_{i+k \cdot 3000}, \quad \text{Gl. 4-5}$$

wobei N die Anzahl dafür genutzter Messwerte beschreibt, die sich aus der Länge des Analyseintervalls und der Samplingfrequenz der Messwerte ableitet. Ein kritischer Punkt bei dieser Qualitätskenngröße ist, dass ein Schwellwert, der zur Identifikation von ionosphärischen Szintillation benutzt wird, effektiv an die Sendeleistung des GNSS-Satelliten (kann durch Alterung bis zu 6 dB vom Nominalverhalten abweichen) und an den

Ausbreitungsweg (Linkbudget in Bezug auf Empfangsleistung) während des Satellitendurchgangs anzupassen ist.

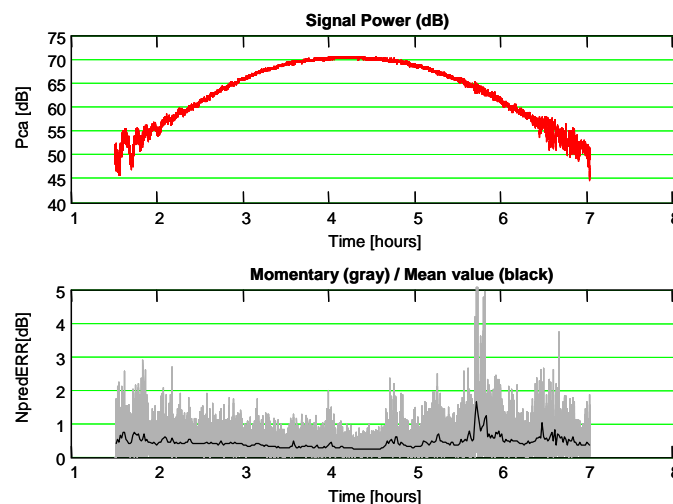


**Abb. 4-53 Variation der empfangenen Signalleistung während eines Satellitendurchgangs und zugeordnet abgeleiteter S4-Index**

Für die Handhabung dieser Effekte wurde die Qualitätskenngröße „Normiertes Leistungsrauschen“ eingeführt, die das Verhältnis des Messwertes zu einem Referenzwert bestimmt. Letzterer wird aus der tageweisen Analyse vorab bestimmter Leistungsrauschwerte satelliten- und stationsspezifisch abgeleitet. Der Mittelwert der S4-Indices als auch der Mittelwert der erhöhten S4-Indices werden als weitere Kenngröße bereitgestellt, um eine abstrahierte Bewertung der S4-Stärke und -Häufigkeit zu ermöglichen. Detailliertere Ausführungen zum Algorithmus des Amplituden-Preprozessors und seiner softwaretechnischen Umsetzung sind in [TN-E 11] enthalten.

#### **VALDIERUNGSBEISPIEL:**

Mit Hilfe dieses Prozessors sollen Leistungseinbrüche der GNSS-Signale durch Referenzierung und eine erhöhte Varianz des Leistungsrauschens in Echtzeit erkannt werden. Das in Abb. 4-54 dargestellte Prozessierungsergebnis verdeutlicht die Leistungsfähigkeit des implementierten Verfahrens. Obwohl die erhöhte Varianz der Signalleistung kurz vor 6:00 UT kaum in ihrem Zeitverlauf erkennbar ist, wird sie identifiziert und beträgt ungefähr das 5-fache des Normalverhaltens. Im Gegensatz dazu werden deutlich erkennbare, erhöhte Variationen in der Signalleistung beim Satellitenaufgang und beim Satellitenuntergang als Normalverhalten bewertet.



**Abb. 4-54 Verlauf der Signalleistung und des in Echtzeit bestimmten normierten Phasenrauschens (GPS PRN 1, 31. Okt. 2003)**

**4.4.4.4 SNR-Preprozessor****AUFGABE:**

Ein Verfahrensansatz wie er für die Code- und Trägerphasen als auch Amplituden umgesetzt wurde, ist durch die Quantifizierung der SNR-Werte nicht sinnvoll. SNR-Werte stellen aber eine Bewertungsalternative zu den Amplituden dar, die jedoch nicht eine Standardausgabe kommerzieller Empfänger ist.

Obwohl die Entwicklung eines höherwertigen Validierungsmoduls im Projekt vorgesehen war, musste diese aus Projektgesamtsicht und verfügbarer Personalressourcen vorab auf eine Minimalvariante beschränkt werden.

**EINGANGSDATEN:**

Der Prozessor arbeitet in der EVnet-Umgebung und nutzt die dort vorhandenen Datenströme, welche GNSS-Beobachtungen verschiedenster Art enthalten. Der Prozessor verarbeitet die SNR-Werte pro Signalkomponente unabhängig von anderen, parallel bestimmten SNR-Werten.

**AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden 2 verschiedene Datenströme pro satelliten- und komponentenspezifischen SNR-Wert erzeugt, deren Bedeutung und Kennung in folgender Tabelle spezifiziert ist:

**Tab. 4-12 Ausgangsdaten des SNR-Preprozessors**

	<b>Kennung</b>	<b>Dateninhalt</b>
1	,f'	Mittlerer SNR inklusive Attribute
2	,g'	Standardabweichung des SNR inklusive Attribute

Diese Ausgangsdaten stehen darauf aufbauenden Prozessoren bei der weiteren Datenverarbeitung in Echtzeit zur Verfügung, wobei die flagbasierten Attribute einerseits die Attribute der zugeordneten Eingangsdaten (ObsCode, SvCode) vererben.

**KONFIGURATIONSPARAMETER:**

- Länge des Datensegments zur Berechnung der statistischen Werte

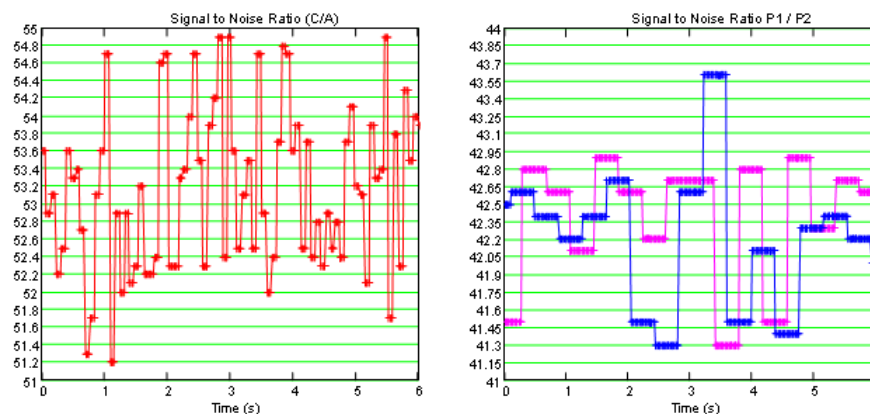
**FUNKTIONSWEISE:**

Alle SNR-Werte innerhalb des konfigurierten Zeitintervalls werden genutzt, um den Mittelwert und die Standardabweichung zu berechnen.

**VALIDIERUNGSBEISPIEL:**

Typische Zeitverläufe quantifiziert bereitgestellter SNR-Werte sind in Abb. 4-55 dargestellt.

In der Art sind die SNR-Werte wenig geeignet, um navigationsrelevante Qualitätskenngrößen in Abhängigkeit von ihnen analysieren und klassifizieren zu können. Deshalb wurde beschlossen, Kurzzeitmittelwerte und zugeordnete Standardabweichungen, wie sie durch diesen Modul gleitend generiert werden, weiterführend zu verwenden.

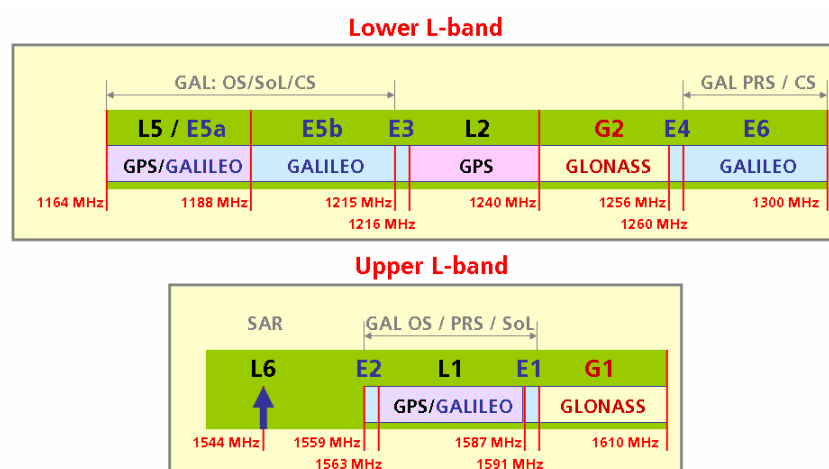


**Abb. 4-55** Beispiel für den Zeitverlauf quantifiziert bereitgestellter SNR-Werte

#### 4.4.5 SW-Entwicklung satellitenbasierter GNSS-Qualitätskenngrößen

Satellitenbasierte GNSS-Qualitätskenngrößen lassen sich aus der Kombination verfügbarer Beobachtungsdaten und u.U. anschließender Filterung oder Zeitreihenanalyse ableiten. Die darin innewohnende Verfahrensvielfalt steigt mit aufsteigender Anzahl gleichzeitig nutzbarer Navigationssignale eines Satelliten.

Operativ nutzbare Satellitennavigationssysteme wie GPS und GLONASS übertragen derzeit Navigationssignale im oberen und unteren L-Band, wobei nur das L1-Band bei GPS und das G1-Band bei GLONASS als Navigationsfrequenzbereiche geschützt sind. Obwohl die kombinierte Nutzung der L1- und L2-Signale bei GPS und der G1- und G2-Signale bei GLONASS bereits die Anwendung von zweifrequenzbasierten Navigationsverfahren ermöglichen, sind sicherheitskritische Anwendung auf die Nutzung des L1- bzw. G1-Signals beschränkt. Mit der Erneuerung von GPS und dem Aufbau von GALILEO werden zukünftig mehr als 2 Navigationssignale pro Satellit bereitgestellt. Bereits dies erhöht die Redundanz an Informationen in den bereitgestellten code- und trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen, die mit Hilfe von neuen, darauf abgebildeten Algorithmen zur Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung beitragen werden.



**Abb. 4-56** Zukünftig genutzte Frequenzbänder für GNSS-Signale

### **EINFREQUENZFALL:**

Im Einfrequenzfall steht nur eine code- und trägerphasenbasierte Entfernungsmessung auf dem L1-Signal im gesicherten Frequenzband zur Verfügung. Die codebasierte Entfernungsmessung (Gl. 4-1) stellt dabei eine Absolutwertschätzung des geometrischen Ranges dar. Sie besitzt jedoch ein erhöhtes Rauschen und Mehrwegeausbreitung bildet sich mit seinen Fehleranteilen von einigen 10 Metern in ihr direkt ab. Im Gegensatz dazu sind Phasenmessungen (Gl. 4-2) durch den unbekannten Mehrdeutigkeitsterm nur Relativmessungen mit nahezu vernachlässigbar kleinen Rauschanteilen und Mehrwegefehleranteilen.

In der Differenz beider Größen sind der geometrischen Range, systembedingte Uhrenfehler (Satellit, Empfänger) und der troposphärische Ausbreitungsfehler eliminiert. Sie kann als Summe des unbekannten, in der Regel konstanten Mehrdeutigkeitsterms, des doppelten, jedoch langsam veränderlichen Ionosphärenfehlers, des code-basierten Mehrwegefehlers und des überlagerten Rauschens interpretiert werden.

$$\rho_{irec}^{isat}(t_n) - \phi_{irec}^{isat}(t_n, \lambda) = +2dion_{irec}^{isat}(t_n) + m_{irec}^{isat}(t_n) + n_{irec}^{isat}(t_n) - \varepsilon_{irec}^{isat}(t_n) + \lambda \cdot N_{irec}^{isat} \quad \text{Gl. 4-6}$$

Mittels einer geeigneten Tiefpassfilterung (TP) kann folglich der niederfrequente Signalanteil extrahiert werden, der näherungsweise dem Mehrdeutigkeitsterm und dem mittleren doppelten Ionosphärenfehler bis auf einem Restfehler entspricht. Wird die gefilterte Größe

$$TP[\rho_{irec}^{isat}(t_n) - \phi_{irec}^{isat}(t_n, \lambda)] = +2dion_{irec}^{isat}(t_n) + \lambda \cdot N_{irec}^{isat} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Wird jetzt die gefilterte Größe der trägerphasenbasierten Entfernungsmessung überlagert, ergibt sich eine verbesserte Schätzung der geometrischen Entfernung

$$S_{irec}^{isat} = \phi_{irec}^{isat}(t_n, \lambda) + TP[\rho_{irec}^{isat}(t_n) - \phi_{irec}^{isat}(t_n, \lambda)] = R_{geo_{irec}^{isat}}(t_n) + c \cdot (dT_{irec}^{isat}(t_n) - dt_{irec}(t_n)) - dion_{irec}^{isat}(t_n) + 2dion_{irec}^{isat}(t_n) + dtro_{irec}^{isat}(t_n) + \varepsilon_{irec}^{isat}(t_n) \quad \text{Gl. 4-8}$$

bei der deutlich der Mehrwegeeinfluss und das Coderauschen reduziert sind. Diese Art von Filterung, die von [Hatch-82] entwickelt wurde, wird auch „Carrier Smoothing“ genannt und ist generell auf Datenkombinationen anwendbar, bei denen die eine Größe einen verrauschten Absolutwert und die andere einen nahe unverrauschten Relativwert darstellt.

Ein Nebenprodukt, das oftmals nicht bekannt ist, ist die Abschätzung des mehrwege- und rauschbedingten Fehleranteils der codebasierten Entfernungsmessung in Echtzeit:

$$m_{irec}^{isat}(t_n) \approx \rho_{irec}^{isat}(t_n) - S_{irec}^{isat} \quad \text{Gl. 4-9}$$

an der sich deutlich erhöhte Fehleranteile und rapide Anstiege detektieren lassen.

Ein kritischer Punkt, wenn Datenfilter eingesetzt werden, ist einerseits die optimale Wahl der Filterparameter und andererseits sein Einschwingvorgang, der letztlich eine zeitabhängige Genauigkeit des Filterergebnisses zur Folge hat. Entsprechende Untersuchungen waren erforderlich, um die in ALEGRO implementierten Filteralgorithmen geeignet zu konfigurieren.

### **ZWEIFREQUENZFALL:**

Im Zweifrequenzfall stehen code- und phasenbasierte Entfernungsmessungen von zwei GNSS-Signalen zur Verfügung. Der ionosphärisch bedingte Laufzeitfehler beträgt in der ersten Näherung

$$dion_{irec}^{isat}(t_n) \approx 40.3 \cdot \frac{TEC_{irec}^{isat}(t_n)}{f_c^2}$$

Gl. 4-10

und ist damit frequenzabhängig. Die Größe TEC beschreibt dabei den akkumulierten Elektronengehalt entlang des ionosphärischen Ausbreitungsweges. Das ermöglicht die Bestimmung des ionosphärisch bedingten Laufzeitfehlers und damit seiner Eigenkorrektur in den verfügbaren Zweifrequenzmessungen.

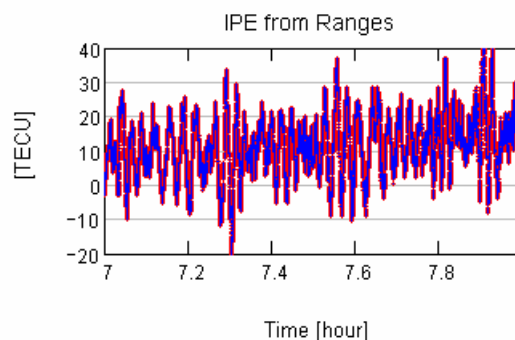
Aus der Differenz der codebasierten bzw. der trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen lässt sich jeweils der ionosphärisch bedingte Laufzeitfehler bestimmen:

$$TEC_{range} \approx \frac{\rho_{irec}^{isat}(t_n, \lambda_1) - \rho_{irec}^{isat}(t_n, \lambda_2)}{-40.3 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 \cdot f_2^2}}$$

Gl. 4-11

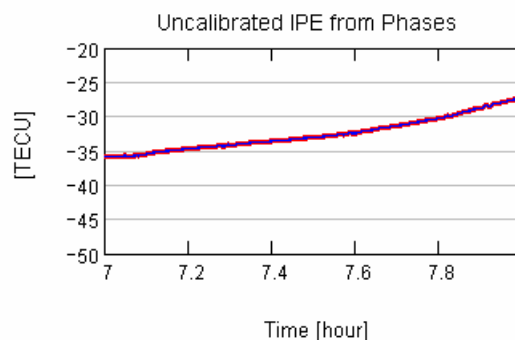
$$TEC_{phase} = \frac{\phi_{irec}^{isat}(t_n, \lambda_1) - \phi_{irec}^{isat}(t_n, \lambda_2)}{40.3 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 \cdot f_2^2}}$$

Aber auch hier gilt, dass die codephasenbasierten TEC-Werte zwar Absolutwertschätzungen sind, aber durch Überlagerung der Mehrwegefehler und des Coderauschens verfälscht sind.



**Abb. 4-57 Ionosphärischer Ausbreitungsfehler (IPE) direkt aus den codephasenbasierten Entfernungsmessungen abgeleitet**

Die trägerphasenbasierten TEC-Werte sind Relativwerte jedoch mit geringen Rauschanteilen.



**Abb. 4-58 Ionosphärischer Ausbreitungsfehler (IPE) direkt aus den trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen abgeleitet**



Auch hier ist es erforderlich, durch Einsatz des „Carrier Smoothing“ eine geeignete Rauschunterdrückung vorzunehmen.

Die TEC-Rate ist ein geeigneter Indikator, um die Dynamik des ionosphärisch bedingten Laufzeitfehlers erfassen zu können. Unter Normalbedingungen sind TEC-Raten deutlich unter 0.02 TECU/s zu beobachten. Bei ionosphärischen Störungen, bei denen hohe TEC-Gradienten und auch Phasenszintillationen beobachtet werden können, impliziert die erhöhte Dynamik des ionosphärischen Laufzeitfehlers im besten Fall ein erhöhtes Fehlerbudget und schlechtesten Fall den Verlust eines zur Positionierung verwendbaren GNSS-Signals. Ersteres ist für die Genauigkeitsbewertung und letzteres für die Integritätsprognose relevant. Um eine Verfälschung durch die Mehrwegeausbreitung zu vermeiden, wird hierfür der trägerphasenbasierte TEC-Wert verwendet, wobei dafür nur Cycle Slip freie Trägerphasenmessungen verwendet werden. Insbesondere bei Verwendung einer hochratiger Datenbasis ist das im mm-Bereich liegende Phasenrauschen bereits der dominante Ergebnisanteil. Um folglich die TEC-Rate extrahieren zu können, ist eine Eigenschätzung des Phasenrauuschens notwendig (siehe Phasen-Preprozessor) und diese als Korrekturgröße anzuwenden.

Für die Bestimmung der Entfernungsmessungen gibt es bei der Zweifrequenzprozessierung effektiv 2 Ansätze:

Die ionosphärenfreie Entfernungsmessung ergibt sich durch TP-.Filterung der Differenz aus der codebasierten, ionosphärenfreien Entfernungsmessung und der phasenbasierten, ionosphärenfreien Entfernungsmessung:

$$\begin{aligned}\hat{\rho}_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n) &\approx \rho_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda_1) - \frac{f_2^2}{f_1^2} \rho_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda_2) \\ \hat{\phi}_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n) &= \phi_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda_1) - \frac{f_2^2}{f_1^2} \phi_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda_2)\end{aligned}\quad \text{Gl. 4-12}$$

Eine alternativ, verwendbare Linearkombination

wobei die erste Gleichung die verrauschte Absolutwertschätzung darstellt und die zweite Gleichung den rauscharmen Relativwert.

Eine alternative Linearkombination, die ionosphärische Ausbreitungsfehler weiter enthält, aber ein geringeres Rauschbudget enthält, ist der Ansatz für ein divergenzfreies „Carrier Smoothing“. Hier wird die Differenz aus der codebasierte Entfernungsmessung auf dem L1-Träger als verrauschter Absolutwert der Entfernungsmessung und einer aus den zweifrequenzbasierten Phasenmessungen abgeleiteten Größe einer TP-Filterung zugeführt.

$$\begin{aligned}\hat{\rho}_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n) &\approx \rho_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda_1) \\ \hat{\phi}_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda_1) &= \phi_{\text{irec}}^{\text{isat}}(t_n, \lambda_1) - 2 \cdot 40.3 \frac{\text{TEC}_{\text{phase}}}{f_1^2}\end{aligned}\quad \text{Gl. 4-13}$$

Dem ersten Verfahren ist der Vorzug zu geben, wenn der ionosphärisch bedingte Fehleranteil deutlich über den mehrwege- und rauschbedingten Fehleranteilen liegt. Bei geringer Sonnenaktivität, also kleinen ionosphärischen Laufzeitfehler ist der Einsatz des 2. Verfahrens vorzuziehen.

In Abhängigkeit von der verwendeten Linearkombination entstehen unterschiedliche Schätzwerte für das Rauschbudget und für mehrwegebedingte Ausbreitungsfehler. Dies ist begründet in ihrem Korrelationsverhalten und in ihrer spezifischen Größe. So ist z.B. die Varianz einer für eine Linearkombination geltenden Rauschgröße nur dann aus den Varianzen der einzelnen Rauschgrößen ableitbar, wenn diese völlig unkorreliert wären. Dies

impliziert die Notwendigkeit, dass für weiterführende Untersuchungen, die sich mit spezifischen Eigenschaften und möglicher Fehlermodellierungen auseinandersetzen, vorab alle Qualitätskenngrößen durch das ALEGRO GBAS aufgezeichnet werden müssen.

Die derzeit implementierten Verfahren sind softwaretechnisch so umgesetzt, dass die Wahl der jeweiligen Eingangsdatenströme (welche Codes, welche Phasen) den jeweiligen Ausgangsdatenstrom charakterisiert. Damit sind diese Verfahren für die direkte Anwendung auf zweifrequenzbasierte GALILEO-Signalkombinationen anwendbar.

#### **MEHRFREQUENZFALL:**

Wenn Daten für mehr als 2 GNSS-Signale eines Satelliten verfügbar sind, erhöht sich die messtechnische Redundanz, die zur Qualitätsüberwachung empfangener GNSS-Signale und damit bestimmter Positionen möglich sind. Rein aus dem Ansatz heraus, zweifrequenzbasierte Verfahren für verschiedene Signalkombinationen eines Satelliten anwenden zu können, ergibt sich das Potenzial, vertiefende Korrelationsanalysen in den Bereichen Mehrwegausbreitung und Rauschen durchzuführen. Dies ist eine Grundlage, um zukünftig verbesserte Messfehlermodelle ableiten zu können und diese im GBAS-Bodensystem und GBAS-Bordsystem in den jeweiligen Verfahren auch zu implementieren. Insbesondere im Bereich der Mehrdeutigkeitsbestimmung, die für phasenbasiertes GBAS notwendig ist, ergeben sich durch deutliche Erhöhung der Kombinationsvielfalt neue Verfahrens- und Lösungsansätze. Diese sind derzeit Gegenstand laufender und auch geplanter Grundlagenforschung. Ihre Implementierung ist jedoch bereits durch das offene Schnittstellenformat und durch den modularen Aufbau des GBAS-Experimentalsystems vorbereitet. Ihre experimentelle Erprobung ist jedoch an die gleichzeitige Verfügbarkeit von 3 trägerdifferenten Navigationssignalen eines GNSS-Satelliten oder auch Pseudolites gebunden. In Bezug auf SEA GATE Signale ist diese Anforderung derzeit nicht erfüllt.

Im Rahmen der linkspezifischen Prozessorentwicklung wurden folgende Prozessoren softwaretechnisch umgesetzt und in die A-GPAF integriert:

- Single Frequency Carrier Smoother
- Dual Frequency Carrier Smoother
- STEC-Prozessor

Diese werden im Folgenden anhand ihrer Aufgabe, den Eingangs- und Ausgangsdaten, wählbarer Konfigurationsparameter, einer Kurzbeschreibung ihrer Funktionsweise sowie repräsentativer Ergebnisse zusammenfassend beschrieben.

#### ***4.4.5.1 Single Frequency Carrier Smoother***

##### **AUFGABE:**

Einfrequenzbasierte, code- und trägerphasenbasierte Entfernungsmessungen, für die die Stetigkeit im Zeitverlauf (erkannte Uhrenrücksetzoperationen, erkannte Cycle Slips) gewährleistet ist, werden entsprechend Gl. 4-7 einer TP-Filterung zugeführt, um daraus eine rauschreduzierte Entfernungsmessung (Gl. 4-8) und eine Abschätzung des Mehrwegefehlers (Gl. 4-9) abzuleiten. Dieses verfahren ist ein in der Luftfahrt und im maritimen Sektor angewendetes Standradverfahren zur Mehrwegeunterdrückung von codebasierten Entfernungsmessungen.

##### **EINGANGSDATEN:**

Der Prozessor arbeitet in der EVnet-Umgebung und nutzt die dort vorhandenen Datenströme, welche GNSS-Messgrößen verschiedenster Art enthalten. Der Prozessor verarbeitet die codephasenbasierten und trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen pro

Satellit und Trägerfrequenz. Für eine Verarbeitung aller Trägersignale aller Satelliten ist folglich eine Parallelschaltung von Prozessoren dieses Typs erforderlich.

#### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden 2 verschiedene Datenströme pro satelliten- und trägerspezifischen Kombination von Code- und Trägerphasen erzeugt. Ihre Zuordnung ist in den vererbten Attributen gekennzeichnet.

**Tab. 4-13 Ausgangsdaten des Prozessors „Single Frequency Carrier Smoother“**

	<b>Kennung</b>	<b>Dateninhalt</b>
○	„X“	Rauschreduzierte code- und trägerphasenbasierte Entfernungsmessung inklusive Attribute
○	„W“	Schätzwert des Mehrwegefehlers und Codephasenrauschens inklusive Attribute

Diese Ausgangsdaten stehen darauf aufbauenden Prozessoren bei der weiteren Datenverarbeitung in Echtzeit zur Verfügung, wobei die flagbasierten Attribute einerseits die Attribute der zugeordneten Eingangsdaten (ObsCode, SvCode) und andererseits den Prozessierungsstatus vererben.

#### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

- Zeitkonstante T des Tiefpass-Filters
- Samplingfrequenz des eingehenden Datenstroms

#### **FUNKTIONSWEISE:**

Die rekursive Bildungsvorschrift zum Ableiten der mit der Trägerphase geglätteten codebasierten Entfernungsmessung lautet allgemein:

$$S_n = \frac{\rho_n + (T - 1) \cdot (S_{n-1} + \varphi_n - \varphi_{n-1})}{T}$$

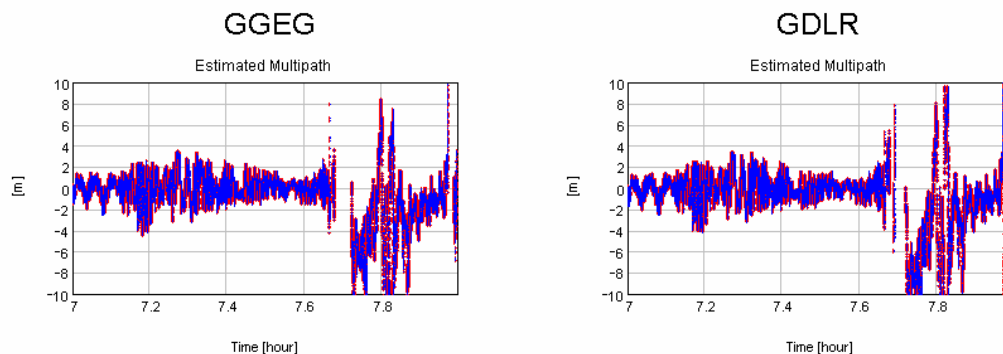
**Gl. 4-14**

Eine fortlaufende Filterung ist gewährleistet, wenn die vorprozessierten Code- und Phasenmesswerte stetig sind. Detektierte jedoch unkorrigierte Cycle Slips als auch Datenlücken, die aus den vorprozessierten Eingangsdaten erkennbar sind, führen zum Neustart des Filters. Eine detaillierte Beschreibung ist in [TN-E 9] erfolgt.

#### **VALDIERUNGSBEISPIEL:**

Typische Zeitverläufe von geschätzten Mehrwegefehlern, die für 2 an einer Antenne betriebenen Empfänger unabhängig voneinander bestimmt wurden, sind in Abb. 4-59 dargestellt.

Da es sich bei Mehrwegefehlern um umgebungsbedingte Ausbreitungsfehler handelt, sollten beide unabhängig bestimmte Zeitverläufe ein näherungsweise identisches Verhalten aufweisen. Dies wird durch Abb. 4-59 bestätigt. Beobachtete Unterschiede resultieren aus der empfängerspezifischen Bereitstellung von Messwerten, die auch bei Empfängern gleicher Bauart Unterschiede in der Datenverfügbarkeit und damit ihrer Prozessierung bewirkt. So ist z.B. erkennbar, dass der GDLR etwas länger Daten bereitstellt, bevor bei beiden Empfängern die Datenbereitstellung in Folge schlechter Signalqualität unterbrochen wird.



**Abb. 4-59 In Echtzeit geschätzter Mehrwegefehler für PRN 23 von 2 an einer Antenne betriebenen GNSS-Empfänger**

#### 4.4.5.2 Dual Frequency Carrier Smoother

##### AUFGABE:

Zweifrequenzbasierte, code- und trägerphasenbasierte Entfernungsmessungen, für die die Stetigkeit im Zeitverlauf (erkannte Uhrenrücksetzoperationen, erkannte Cycle Slips) gewährleistet ist, werden kombiniert genutzt, um codephasenbasierte und trägerphasenbasierte Entfernungsmessungen abzuleiten, in denen der Ionosphärenanteil eliminiert wurde (Gl. 4-12). Diese werden einer TP-Filterung, wie in Gl. 4-7 beschrieben, zugeführt, um eine rauschreduzierte Entfernungsmessung und den zugeordneten Mehrwegefehler zu bestimmen.

##### EINGANGSDATEN:

Der Prozessor verarbeitet die codephasenbasierten und trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen, die aus 2 Navigationssignalen eines Satelliten durch den Empfänger abgeleitet und bereitgestellt werden. Für eine Verarbeitung aller Satellitensignalkombinationen ist folglich eine Parallelschaltung von Prozessoren dieses Typs erforderlich.

##### AUSGANGSDATEN:

Als Ergebnis der Prozessierung werden 2 verschiedene Datenströme pro satelliten- und trägerspezifischer Kombination von Code- und Trägerphasen erzeugt. Ihre Zuordnung ist in den vererbten Attributen gekennzeichnet.

**Tab. 4-14 Ausgangsdaten des Prozessors „Dual Frequency Carrier Smoother“**

	Kennung	Dateninhalt
1	,Y'	Rauschreduzierte code- und trägerphasenbasierte Entfernungsmessung (Zweifrequenzansatz) inklusive Attribute
2	,J'	Schätzwert des überlagerten Mehrwegefehlers und Codephasenrauschens inklusive Attribute

Diese Ausgangsdaten stehen darauf aufbauenden Prozessoren bei der weiteren Datenverarbeitung in Echtzeit zur Verfügung, wobei die flagbasierten Attribute einerseits die Attribute der zugeordneten Eingangsdaten (ObsCode, SvCode) und andererseits den Prozessierungsstatus vererben.

### KONFIGURATIONSPARAMETER:

- Zeitkonstante T des Tiefpass-Filters
- Samplingfrequenz des eingehenden Datenstroms

### FUNKTIONSWEISE:

Die rekursive Bildungsvorschrift zum Ableiten der mit der Trägerphase geglätteten codebasierten Entfernungsmessung lautet allgemein:

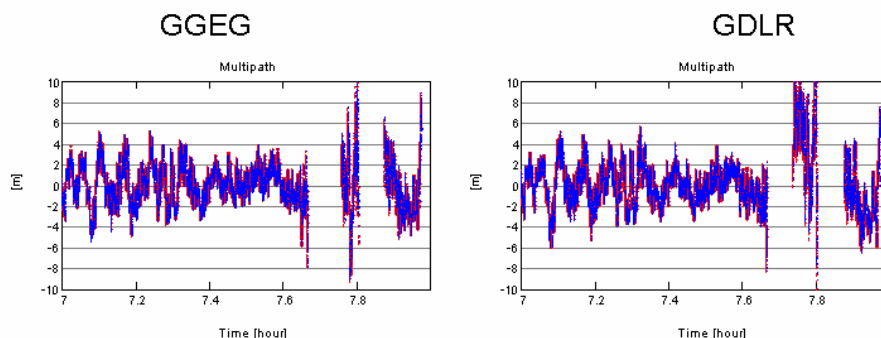
$$S_n = \frac{\rho_n + (T - 1) \cdot (S_{n-1} + \varphi_n - \varphi_{n-1})}{T}, \quad \text{Gl. 4-15}$$

wobei bei diesem Prozessor  $\rho_n$  und  $\varphi_n$  durch die abgeleiteten Terme in (Gl. 4-12) definiert sind.

Eine fortlaufende Filterung ist gewährleistet, wenn die vorprozessierten Code- und Phasenmesswerte stetig und für beide Trägerfrequenzen verfügbar sind. Detektierte jedoch unkorrigierte Cycle Slips als auch Datenlücken, die aus den vorprozessierten Eingangsdaten erkennbar sind, führen zum Neustart des Filters. Eine detaillierte Beschreibung ist in TN-E 8 erfolgt.

### VALDIERUNGSBEISPIEL:

Typische Zeitverläufe von geschätzten Mehrwegefehlern für den Zweifrequenzansatz, die für 2 an einer Antenne betriebenen Empfänger unabhängig voneinander bestimmt wurden, sind in Abb. 4-60 dargestellt.



**Abb. 4-60 In Echtzeit geschätzter Mehrwegefehler (Zweifrequenzansatz) für PRN 23 von 2 an einer Antenne betriebenen GNSS-Empfänger**

Da es sich bei Mehrwegefehlern um umgebungsbedingte Ausbreitungsfehler handelt, sollten beide unabhängig bestimmte Zeitverläufe ein näherungsweise identisches Verhalten aufweisen. Dies wird durch Abb. 4-60 bestätigt. Beobachtete Unterschiede resultieren aus der empfängerspezifischen Bereitstellung von Messwerten, die auch bei Empfängern gleicher Bauart Unterschiede in der Datenverfügbarkeit und damit ihrer Prozessierung bewirkt. So ist nach der ersten Datenlücke beim GDLR ein etwas veränderter Zeitverlauf des Mehrwegefehlers erkennbar, der durch den früheren Filterungsbeginn aus der früheren Datenverfügbarkeit resultiert und folglich ein verändertes Einschwingverhalten des TP zur Folge hat.

#### **4.4.5.3 Slant TEC Processor**

### AUFGABE:

Zweifrequenzbasierte, code- und trägerphasenbasierte Entfernungsmessungen, für die die Stetigkeit im Zeitverlauf (erkannte Uhrenrücksetzoperationen, erkannte Cycle Slips)

gewährleistet ist, werden kombiniert genutzt, um codephasenbasierte und trägerphasenbasierte Werte des ionosphärischen Laufzeitfehlers beschrieben durch entsprechende TEC-Werte abzuleiten. Diese werden einer TP-Filterung, wie in [Gl. 4-7](#) beschrieben, zugeführt, um eine rauschreduzierte TEC-Wertschätzung zu bestimmen. Diese codephasenbasierte und trägerphasenbasierte Werte des ionosphärischen Laufzeitfehlers werden weiterführend intern genutzt, um eine rauschreduzierte TEC-Wertschätzung durch gleitende Mittelung zu erzielen. Durch die hohe Empfindlichkeit beider TEC-Wertbestimmungen gegenüber Rausch- und Mehrwegefehlern wurde ergänzend eine „Gain“-Kontrolle implementiert. Diese übernimmt eine Eigenüberwachung der nach einem Neustart des Prozessors notwendigen Einschwingvorgänge der Filter. Wenn prespezifizierte Genauigkeitsbedingungen erfüllt sind, wird neben dem „smoothed TEC“ ein so genannter „improved TEC“ bereitgestellt. Als weitere Qualitätskenngröße wird die ausschließlich aus den trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen abgeleitete TEC-Rate bereitgestellt. Um den Einfluss des Trägerphasenrauschens bei einer hochratigen Prozessierung geeignet zu unterdrücken, wird die so bestimmte TEC-Rate einer Rauschkorrektur unterzogen, bevor sie als „unnoisy“ TEC-Rate als Ausgabewert bereitgestellt wird. Für diesen Wert werden auch statistische Kenngrößen in Form von Kurzzeitmittelwert und Kurzzeitstandardabweichung bereitgestellt.

#### **EINGANGSDATEN:**

Der Prozessor verarbeitet die codephasenbasierten und trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen, die aus 2 Navigationssignalen eines Satelliten durch den Empfänger abgeleitet und bereitgestellt werden. Für eine Verarbeitung aller Satellitensignalkombinationen ist folglich eine Parallelschaltung von Prozessoren dieses Typs erforderlich.

#### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden 5 verschiedene Datenströme jeder satelliten- und trägerspezifischer Kombination von Code- und Trägerphasen erzeugt. Ihre Zuordnung ist in den vererbten Attributen gekennzeichnet.

**Tab. 4-15 Ausgangsdaten des STEC-Prozessors**

	<b>Kennung</b>	<b>Dateninhalt</b>
1	,s'	Rauschreduzierte TEC-Schätzung aus „Carrier Smoothing“ inklusive Attribute
2	,i'	Rauschreduzierte TEC-Schätzung in Bezug auf einzuhaltende Genauigkeitsanforderungen inklusive Attribute
3	,r'	TEC-Rate mit Rauschunterdrückung inklusive Attribute
4	,t'	Kurzzeitmittelwert der TEC-Rate inklusive Attribute
5	,u'	Kurzzeitstandardabweichung der TEC-Rate inklusive Attribute

Diese Ausgangsdaten stehen den darauf aufbauenden Prozessoren bei der weiteren Datenverarbeitung in Echtzeit zur Verfügung, wobei die flagbasierten Attribute einerseits die Attribute der zugeordneten Eingangsdaten (ObsCode, SvCode) und andererseits den Prozessierungsstatus vererben.

### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

- Zeitkonstante T des Tiefpass-Filters
- Samplingfrequenz des eingehenden Datenstroms
- Quantifizierungsschrittweite bereitgestellter Trägerphasenwerte
- Genauigkeitsschwellwert
- Länge des Datensegments für kurzzeitstatistische Werte

### **FUNKTIONSWEISE:**

Die rekursive Bildungsvorschrift zum Ableiten geglätteter TEC-Werte lautet allgemein:

$$S_n = \frac{\rho_n + (T - 1) \cdot (S_{n-1} + \varphi_n - \varphi_{n-1})}{T}, \quad \text{Gl. 4-16}$$

wobei bei diesem Prozessor  $\rho_n$  und  $\varphi_n$  durch die abgeleiteten Terme in (Gl. 4-11) definiert sind. Eine fortlaufende Filterung ist gewährleistet, wenn die vorprozessierten Code- und Phasenmesswerte stetig und für beide Trägerfrequenzen verfügbar sind. Detektierte jedoch unkorrigierte Cycle Slips als auch Datenlücken, die aus den vorprozessierten Eingangsdaten erkennbar sind, führen zum Neustart des Filters.

Bei der gleitenden Mittelung wird intern der Mehrdeutigkeitsterm wie folgt bestimmt

$$\text{averaged}N_n = \overline{\text{TEC}_{\text{range},k} - \text{TEC}_{\text{phase},k}} \Big|_{k=0 \dots n}. \quad \text{Gl. 4-17}$$

Dieser wird dann fortlaufend zur Kalibrierung von  $\text{TEC}_{\text{phase},k}$  verwendet.

Für die „Gain“-Kontrolle wird das Kurzzeit-RMS der Änderung des Mehrdeutigkeitsterms genutzt.

$$\text{rms}_{n,K} = \sqrt{\frac{1}{K} \cdot \sum_{j=n-K+1}^K (\text{Averaged}N_j - \text{Averaged}N_{j-1})^2}. \quad \text{Gl. 4-18}$$

Unterschreitet dieser einen prespezifizierten Schwellwert, wird das so genannte „improved TEC“ bereitgestellt.

Die „unnoisy“ TEC-Rate wird als

$$\text{unnoisyTECrate}_n = \frac{\text{phaseTEC}_n - \text{phaseTEC}_{n-1}}{\text{time}_n - \text{time}_{n-1}} - \varepsilon_{\text{noise}} \quad \text{Gl. 4-19}$$

bestimmt, wobei der Korrekturterm aus den vom Phasen-Preprozessor bereitgestellten Schätzwerten des momentanen Phasenrauschens abgeleitet wird. Eine detaillierte Beschreibung ist in [TN-E 6] nachlesbar.

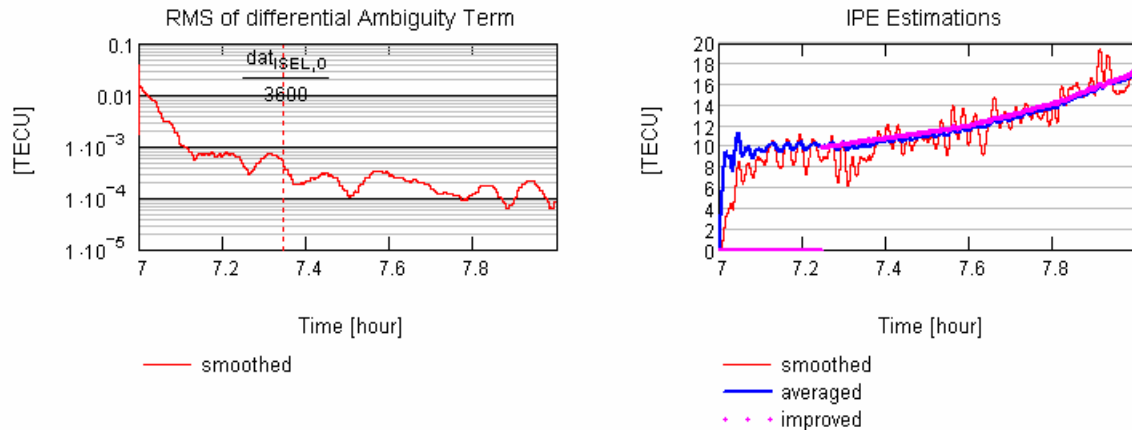
### **VALDIERUNGSBEISPIEL:**

Zugeordnet zu Abb. 4-57 und Abb. 4-58, in denen die codephasenbasierten und trägerphasenbasierten TEC-Werte dargestellt sind, sind in Abb. 4-61 die Prozessorergebnisse für die verschiedenen TEC-Wertschätzungen abgebildet.

Deutlich erkennbar ist, dass der geglättete TEC-Wert noch eine Restvarianz enthält, die aus dem Resteinfluss des mit Hilfe des Tiefpass-Filters unterdrückten Rausch- und Mehrwegefehleranteils resultiert. Der mit Hilfe der gleitenden Mittelung bestimmte Wert variiert zwar mit zunehmender Mittelungszeit weniger, besitzt aber dennoch einen Restfehler, der sich aus dem gemittelten Mehrwegefehler ergibt. Beide Filterungsarten besitzen darüber

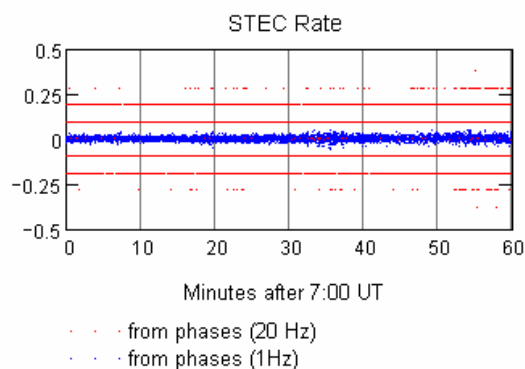


hinaus noch unterschiedliche Einschwingvorgänge, die es zu beachten gilt. Deutlich erkennbar ist, dass die „Gain“-Kontrolle es ermöglicht, den Zeitpunkt zu bestimmen, ab dem TEC-Werte als Korrekturgrößen die geforderte Genauigkeit (unter 1 TECU, auf L1 unter 16 cm) erfüllen.

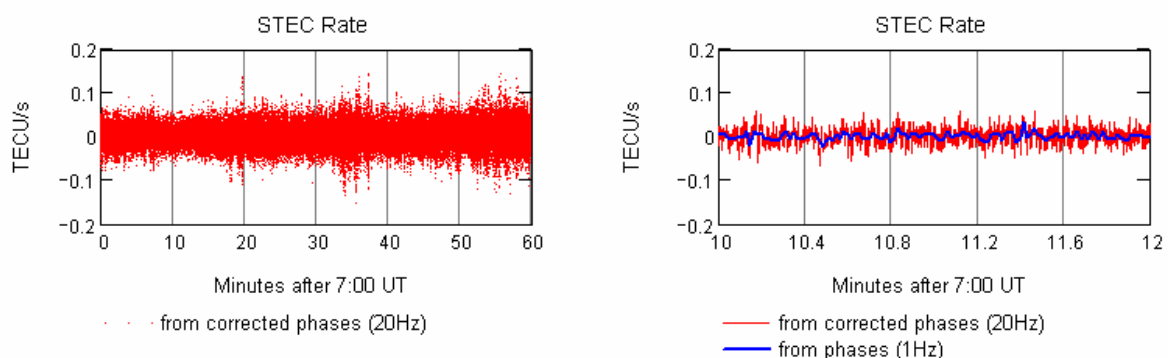


**Abb. 4-61** In Echtzeit bestimmte TEC-Werte (rechts) und Zeitverlauf der „Gain“-Kontrolle (links)

Direkt aus Phasenmessungen abgeleitete TEC-Raten sind in Abb. 4-62 dargestellt. Deutlich erkennbar ist der Quantifizierungseffekt, der aus der numerischen Darstellung der gelieferten Phasenmesswerte resultiert.



**Abb. 4-62** TEC-Raten direkt abgeleitet aus Phasenmessungen



**Abb. 4-63** STEC-Rate

Da diese Quantifizierungseffekte neben dem eigentlichen Phasenrauschen auch Bestandteil der Phasenrauschabschätzungen des Phasen-Preprozessors sind, führt eine damit durchgeführte Rauschkorrektur dann zu den in Abb. 4-63 dargestellten Ergebnissen. Ob die erhöhte Varianz, die in den 20 Hz Phasenraten gegenüber den 1 Hz Phasenraten beobachtet werden kann, eher dem Restfehler der Rauschkorrektur entspricht oder die 1 Hz TEC-Rate nur eingeschränkt die natürliche Varianz widerspiegelt, kann derzeit nicht geklärt werden.

#### **4.4.6 SW-Entwicklung stationsbasierter GNSS-Qualitätskenngrößen**

Stationsbasierte Qualitätskenngrößen werden auf der Grundlage der Daten aller an der Station empfangenen Navigationssignale abgeleitet.

Werden die Messwerte aller Satellitensignale einer Positionsbestimmung zugeführt, so ist es an einer Referenzstation möglich, den absoluten Positionsfehler durch Vergleich der bestimmten mit der bekannten Position zu ermitteln. Dieses Eigenmonitoring muss jedoch unter Beachtung des genutzten Verfahrens ausgeführt werden. Abgeleitete Qualitätsaussagen sind folglich auch nur für dieses spezifisch eingesetzte Verfahren gültig. Zugeordnete Entwicklungen sind in Kap. 4.4.6.1 beschrieben.

Verschiedenste DOP-Werte (Dilution of Precision) können bestimmt werden, um den Einfluss der geometrischen Empfangssituation zu beschreiben. Werden die DOP-Werte für die theoretisch sichtbaren Satelliten bestimmt, so wird der Idealfall beschrieben. Ist die Anzahl zur Positionsbestimmung genutzter Satelliten reduziert, so ist im Allgemeinen mit einer Verschlechterung der DOP-Werte zu rechnen. Die Verwendung einer reduzierten Anzahl von Satellitensignalen zur Positionierung kann durch umgebungsbedingte Signalabschattungen aber auch durch das bewusste Ausblenden stark gestörter Satellitensignale begründet sein. Durch eine Abschätzung des jeweils schlecht- und bestmöglichen DOP-Werte in Bezug auf alle Kombinationen theoretisch nutzbarer Satelliten ist folglich das gesamte Spektrum geometrisch denkbarer Empfangssituationen für den aktuellen Messzeitpunkt beschreibbar. Diese wurde durch den DOP-Prozessor (Kap. 4.4.6.2) umgesetzt.

Im Kap. 4.4.6.3 wird eine Prozessorentwicklung beschrieben, die die für die Navigation bei sicherheitskritischen Anwendungen notwendige Bestimmung der Zuverlässigkeit und des Fehlerverhaltens der errechneten Lösung auf der Grundlage von RAIM umsetzt.

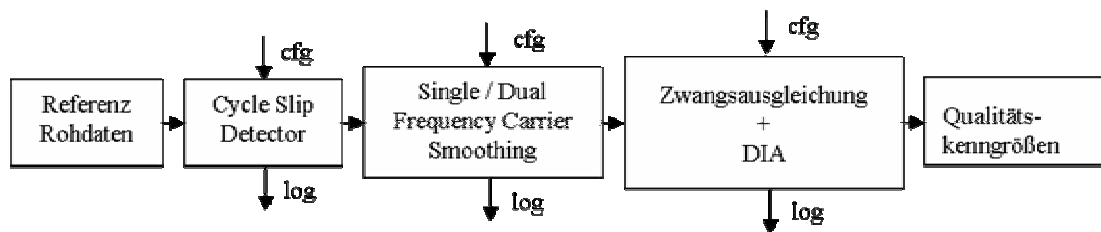
##### **4.4.6.1 Verfahrensspezifische Positionsfehler und DIA**

###### **AUFGABE:**

Durch ihre bekannte Eigenposition ist es an der Referenzstation möglich, ein so genanntes Eigenmonitoring durchzuführen, d.h. ihre Beobachtungen auf mögliche Fehler zu überprüfen, sie gegebenenfalls als fehlerhaft zu markieren und diese Informationen an einen Rover weiterzuleiten, der sie dann von der Prozessierung ausschließen kann.

Hierbei sein angemerkt, dass auch der Rover selbst ein Eigenmonitoring durchführen muss, um lokal auftretende Fehler wie zum Beispiel Mehrwegeeffekte beseitigen zu können (siehe Kap. 4.5.3.1).

Das nachfolgende Blockschaltbild veranschaulicht das Verfahren von der Rohdatenbereitstellung bis hin zur Ableitung von stationsspezifischen Qualitätskenngrößen. Deutlich erkennbar ist, dass dafür Prozessierungsketten mit bereits in den Kap. 4.4.4 und 4.4.5 beschriebenen Prozessoren gebildet werden.



**Abb. 4-64 Algorithmus zur Gewinnung von Qualitätskenngrößen**

Über das Modul „Cycle Slip Detector“ werden die Beobachtungen zuerst auf mögliche Cycle Slips überprüft. Beim Aufruf des Moduls „Single Frequency Carrier Smoothing“ oder „Dual Frequency Carrier Smoothing“ wird eine phasenbasierte Code-Glättung durchgeführt. Nachdem die Beobachtungen von troposphärischer und ionosphärischer Refraktion korrigiert worden sind, wird eine Zwangsangleichungsrechnung durchgeführt, um die unbekannten Parameter wie Empfängeruhrenfehler und die Koordinaten der Antennenposition zu bestimmen. Bis hierhin entspricht diese Verfahrensweise einem Positionslöser. Je nachdem, ob ein- oder zweifrequenzbasierte Messwerte genutzt werden, ist mit unterschiedlichen Ergebnissen zu rechnen.

Im Anschluss an die Ausgleichung werden statistische Tests durchgeführt, um eine Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsaussage über die berechneten Parameter sowie mögliche Ausreißer zu bekommen. Unterschreiten die berechnete Zuverlässigkeit bzw. Genauigkeit bestimmte festgelegte Konfigurationseinstellungen, wird eine Warnung bezüglich des entsprechenden Parameters erzeugt und die Beobachtung gekennzeichnet. Eine detaillierte Beschreibung dieser Verfahren ist in [TN-E 2] nachlesbar.

#### **EINGANGSDATEN:**

Derzeit sind der einfrequenz- und der zweifrequenzbasierte Basisprozessor implementiert. Als Eingangsdaten werden die aus der Vorverarbeitung jeweiligen mit Trägerphasen geglätteten Entfernungsmessungen genutzt.

#### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung liegen die bereits beschriebenen NMEA-Messages vor. Beobachtungen, die von dem DIA Algorithmus als Ausreißer detektiert worden sind, werden mittels eines Flags gekennzeichnet.

#### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

Zum Start des Prozessors müssen

- WGS84-Koordinaten der GBAS-Referenzstation
- Normierte Verbesserung (Quantil für eine Normalverteilung) für den DIA Algorithmus

in einer Konfigurationsdatei festgelegt werden.

#### **FUNKTIONSWEISE:**

Um eine Ausgleichung durchführen zu können, müssen mehr Beobachtungen vorhanden sein als eine eindeutige Lösung des Problems verlangen würde (Redundanz). Eine Ausgleichungsrechnung liefert dann die besten Schätzwerte für die Unbekannten unter Berücksichtigung aller vorhandenen Beobachtungen. Um Aussagen über die Qualität der durchgeführten Beobachtungen und der Ergebnisse treffen zu können, und damit auch die Ausgleichung selbst beurteilen zu können, werden statistische Kenngrößen berechnet. Dabei wird der Begriff Qualität in die Kategorien Genauigkeit und Zuverlässigkeit unterteilt:

**▪ Genauigkeit**

Die Genauigkeit drückt das Maß der Annäherung des Ergebnisses an den wahren Wert und dessen Streuung aus. Dies wird ausgedrückt mittels des mittleren Fehlers und der Standardabweichung. Diese Berechnungen werden im kartesischen Koordinatensystem WGS84 vorgenommen und anschließend in das lokale Koordinatensystem des Nutzers transformiert, um sie leichter interpretierbar zu machen (Visualisierung). Des Weiteren wird für die Visualisierung dieser Qualitätskenngröße eine Fehlerellipse berechnet (beschrieben durch ihre große und kleine Halbachse und den Drehwinkel bezüglich der Nordrichtung).

**▪ Zuverlässigkeit**

Zuverlässigkeitsaussagen basieren auf der im Ausgleichungsmodell enthaltenen Kontrollmöglichkeiten von Beobachtungen und der damit gegebenen Möglichkeit, grobe Fehler zu identifizieren und deren Auswirkung auf die zu bestimmenden Parameter abzuschätzen. Die Zuverlässigkeit unterteilt man in:

- Innere Zuverlässigkeit:  
Kontrollierbarkeit der Beobachtungen
- Äußere Zuverlässigkeit  
Auswirkung von nicht erkennbaren groben Fehlern auf die Ergebnisse

Eine Ausgleichung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate ist nicht robust gegenüber groben Fehlern (fehlerhafte Beobachtungen). Deshalb werden statistische Tests (Ausreißertest) durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu überprüfen, denn bekanntlich enthält jede Beobachtung einen mehr oder weniger großen „Messfehler“. Liegt ein grober Fehler in den Beobachtungen vor, schlägt sich dieser sowohl in den Verbesserungen (Residuen) als auch in der geschätzten Standardabweichung nach der Ausgleichung nieder. Diese Satelliten werden als fehlerhaft gekennzeichnet und aus der Positionsbestimmung ausgeschlossen.

Ein Restrisiko in diesem Verfahren bleibt, wenn ein nicht erkannter Fehler sich in den geschätzten, ausgeglichenen Unbekannten niederschlägt. Mit Hilfe der Tests und einer vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit (Signifikanzniveau) lassen sich nun diese Anteile und die Abgrenzung zwischen zufälligen Fehleranteilen und Ausreißern (grobe Fehler) ermitteln.

Neben diesen klassischen Qualitätskenngrößen werden hier weitere Kenngrößen (DOP und Integrität) berechnet und ausgewertet.

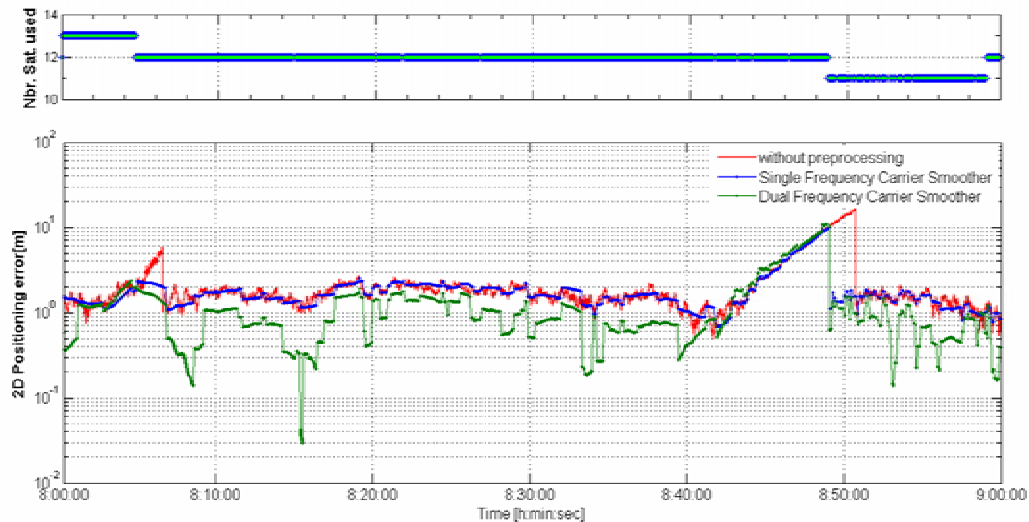
**VALIDIERUNGSBEISPIEL:**

Die Wirksamkeit des DIA-Verfahrens ist anhand der Gegenüberstellung folgender Positionsergebnisse erkennbar.

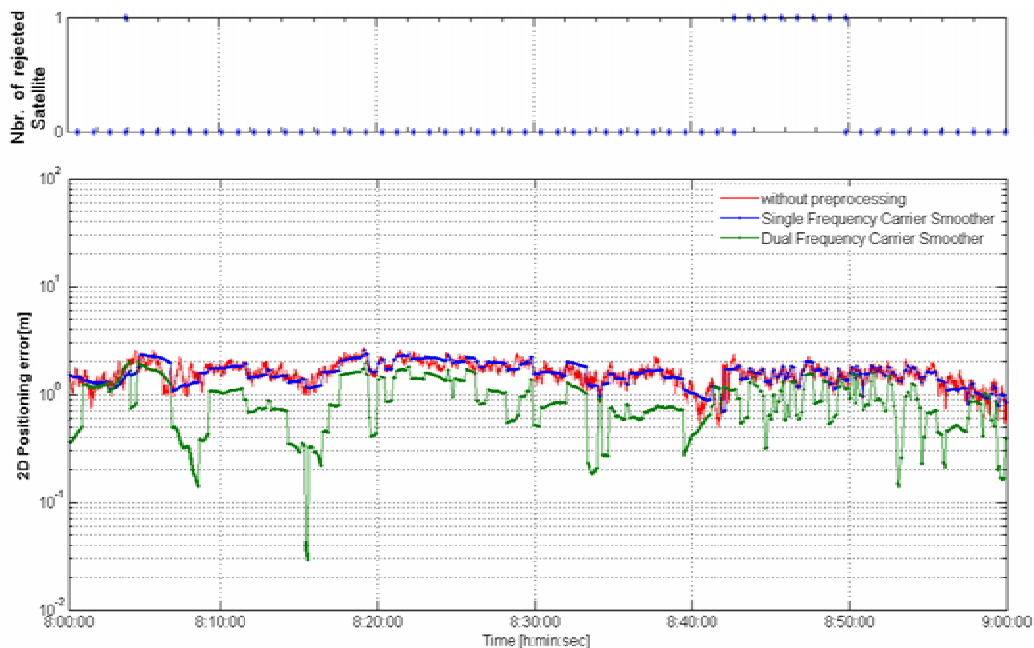
In Abb. 4-65 ist der Positionsfehler bei ausgeschalteten DIA-Verfahren für den Zeitraum (8:00 bis 9:00 UT am 04.03.2008) dargestellt. Deutlich erkennbar sind Positionsfehler bis zu 10 Metern. Die Anzahl zur Positionsbestimmung verwendeter Satelliten (obere Grafik) ist identisch mit der Anzahl von Satelliten, für die der Empfänger Beobachtungsgrößen bereitgestellt hat.

Das Ergebnis bei eingeschalteten DIA-Verfahren, das auf der gleichen Datenbasis beruht, entspricht der Abb. 4-66. Abweichend zu Abb. 4-65 beschreibt die obere Grafik die Anzahl der Satelliten, die als Ergebnis des DIA-Verfahrens von der Positionsbestimmung

ausgeschlossen wurden. Daraus ist erkennbar, dass nach 8:40 Uhr für einen Satelliten ein grober Fehler detektiert wurde. In dem die Messwerte dieses Satelliten nicht zur Positionsbestimmung genutzt werden, konnte erreicht werden, dass der horizontale Positionsfehler deutlich unter 2 m im gesamten Zeitraum blieb.



**Abb. 4-65 Positionsfehler an der GBAS-Referenzstation (ohne DIA)**



**Abb. 4-66 Positionsfehler an der GBAS-Referenzstation (mit DIA)**

#### 4.4.6.2 DOP-Prozessor

##### AUFGABE:

DOP-Werte stellen Kenngrößen dar, die Aussagen über die Genauigkeit liefert, mit der sich die Nutzerposition in einer bestimmten geometrischen Empfangssituation bestimmen lässt. Unter Empfangssituation ist hier die durch Anzahl und Position der Satelliten bestimmte Situation zu verstehen (geometrischer DOP). Abschattungen von Satelliten durch lokale Hindernisse und der Beobachtungshorizont können also durch den DOP erfasst werden.

Die Aufgabe des DOP-Prozessor besteht in der Bestimmung der jeweils schlecht- und bestmöglichen DOP-Werte für Satellitenkonstellationen von vier Satelliten bis hin zur lokal maximal empfangbaren Anzahl von Satelliten.

DOP-Werte (Dilution of Precision) werden aus der mit der Lösung des „stand alone“ Positionierungsproblems in direktem Zusammenhang stehenden Korrelationsmatrix  $C$  bestimmt. Standardmäßig sind folgende DOP-Werte definiert [GPS-ICD]:

$GDOP = \sqrt{\text{trace}(\bar{C})}$	Gesamt-DOP (4D)	Gl. 4-20
$TDOP = \sqrt{C_{44}}$	DOP der Empfängeruhr	
$PDOP = \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33}}$	DOP der Nutzerposition (3D)	
$HDOP = \sqrt{C'_{11} + C'_{22}}$	DOP der Nutzerposition in der horizontalen Ebene (2D)	
$VDOP = \sqrt{C'_{33}}$	DOP der Nutzerposition in der vertikalen Ebene (Höhenfehler)	

$\bar{C}$  .... die in das lokale Nutzerkoordinatensystem transformierte Matrix  $\bar{C}$ .

Eine kombinierte Auswertung der bestimmten Geometriefehlern (GNSS-Satellitenbahnen) und der abgeschätzten Rangefehlern liefert eine Abschätzung des Positionierungsfehlers.

Mit der Grundgleichung zur Bestimmung der Nutzerposition

$$\Delta \bar{X} = \bar{A} \cdot \Delta \bar{R} \quad \text{Gl. 4-21}$$

transformiert sich jeder Rangefehler  $\Delta \bar{R}$  infolge der in  $A$  enthaltenen Nutzer-Satellitengeometrie in einen Positionsfehler  $\Delta \bar{X}$ .

Zwischen den Kovarianzvektoren der Range- und Positionsfehler

$$\begin{aligned} \text{cov}(\bar{R}) &= E\{\Delta \bar{R} \cdot \Delta \bar{R}^T\} \\ \text{cov}(\bar{X}) &= E\{\Delta \bar{X} \cdot \Delta \bar{X}^T\} \end{aligned} \quad \text{Gl. 4-22}$$

besteht damit folgender Zusammenhang:

$$\text{cov}(\bar{X}) = (\bar{A}^T \bar{A})^{-1} \cdot \text{cov}(\bar{R}) \equiv \bar{C} \cdot \text{cov}(\bar{R}) \quad \text{Gl. 4-23}$$

Auf Grund des einfachen Zusammenhangs zur Standardabweichung des Positionsfehlers (die räumlichen Komponenten des Vektors  $\text{cov}(\bar{X})$  sind die Varianzen der X, Y, und Z-Komponenten der Standardabweichungen des Positionsfehlers  $\Delta \bar{X}$ ) erlaubt dieser Zusammenhang bei Kenntnis der Rangefehler eine Abschätzung der rein geometrisch bedingten Auswirkung von Rangefehlern auf die erreichbare Positionsgenauigkeit.

Das DOP-Modul wird einmal zur Einschätzung der rein geometriebedingten nutzerseitig erreichbaren Genauigkeit unter Beachtung der Kombinatorik sichtbarer Satelliten und andererseits zur Fehlerabschätzung unter Beachtung der für die Positionsbestimmung genutzten Satellitensignale verwendet.

PDOP, HDOP und VDOP sind die zur praktischen Einschätzung des Navigationsfehlers am häufigsten genutzten Größen, da sie eine Einschätzung des 3D-Fehlers (PDOP), des lokalen horizontalen Positionsfehlers (HDOP) und des lokalen vertikalen Positionsfehlers erlauben. In Bezug auf maritime Anforderungen (siehe Kap. 1) kommt dem HDOP besondere Rolle zu.

DOP-Werte variieren wenig mit kleinen Änderungen des Beobachtungsortes, so dass für den Ort der Basisstation berechnete Werte signifikant für das durch das phasenbasierte GBAS-System bediente Gebiet sind und somit der Einschätzung der auf Grund der Nutzer-Satellitengeometrie erreichbaren Genauigkeit dienen.

#### **EINGANGSDATEN:**

Der Prozessor arbeitet in der EVnet-Umgebung (EVnet-SW-API) und nutzt nur die aus den empfangenen Rohdaten abgeleiteten und über das EVnet-WS-API verteilten Keplerelemente (Ephemeriden). Die Definition der der Keplerelemente und der für DOP-Prozessor verwendeten Grundalgorithmen sind in [GPS-ICD] beschrieben.

#### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden die in der nachfolgenden Tabelle genannten neuen EVnet-Datenströme mit DOP-spezifischen pseudo-RINEX3-Attributen generiert.

**Tab. 4-16 Ausgangsdaten des DOP-Prozessors**

	<b>Kennung</b>	<b>Dateninhalt</b>
1	bestDOPs,hdop pH	Bester HDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten
2	bestDOPs,vdop pV	Bester VDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten
3	bestDOPs,gdop pG	Bester GDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten
4	bestDOPs,pdop	Bester PDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten
5	worstDOPs,hdop qH	Schlechtester HDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten
6	worstDOPs,vdop qV	Schlechtester VDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten
7	worstDOPs,gdop qG	Schlechtester GDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten
8	worstDOPs,pdop qP	Schlechtester PDOP für das GNSS GnssID und K Satelliten

#### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

Zum Start des Prozessors müssen

- WGS84-Koordinaten der GBAS-Referenzstation
- das zeitliche Intervall in dem DOP-Werte berechnet werden sollen

in einer Konfigurationsdatei festgelegt werden.

#### **FUNKTIONSWEISE:**

Der entwickelte DOP-Präprozessor bestimmt die minimalen und maximalen DOP für Konstellationen von  $n = 4$  bis  $N$  Satelliten. Dabei werden aus den auf Grund der Geometrie sichtbaren Satelliten  $N$  Satelliten alle möglichen Konstellationen von  $k = 4 \dots N$  Satelliten ausgewählt und die verschiedenen DOP-Werte berechnet. Der für ein bestimmtes  $k$  berechnete beste und schlechteste DOP wird über das EVnet-Interface an nachgeschaltete

Prozessoren weiter geleitet. Eine detaillierte Beschreibung der mathematischen Grundlagen und der Implementierung ist in [GPS-ICD] zu finden.

#### **4.4.6.3 Integritätsprozessor**

##### **AUFGABE:**

Wie bereits im Kap. 2 ausgeführt, ist für die Navigation bei sicherheitskritischen Anwendungen nicht nur eine genaue Positionierung, sondern auch eine Angabe über die Zuverlässigkeit und des Fehlerverhaltens der errechneten Lösung notwendig. Während die Angabe der Genauigkeit oftmals durch statistische Kenngrößen einer angenommenen Gauß-Verteilung beschrieben wird, gibt das Konzept der Integrität einen maximal auftretenden Positionsfehler an, der unabhängig von der zugrunde liegenden Fehlerverteilung nur mit einem bestimmten Restrisiko, dem Integritätsrisiko, überschritten wird. Der maximal auftretende Fehler wird üblicherweise getrennt als *Horizontal Protection Level* und *Vertical Protection Level* angegeben.

Zur Bestimmung eines Protection Levels ohne Zuhilfenahme externer Informationen wird *Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)* eingesetzt. Hier wird aufgrund der Überbestimmtheit des bei mehr als 4 sichtbaren Satelliten vorhandenen Gleichungssystems die Tatsache ausgenutzt, dass die Messfehler der einzelnen Entfernungsmessungen im Residuum der Lösung des linearisierten Gleichungssystems sichtbar werden. Existiert in einer einzelnen Entfernungsmessung ein systematischer Messfehler (*Bias*) von hinreichender Größe, so wirkt sich dies erkennbar stärker auf die Summe der Restfehlerquadrate aus, als das reguläre Messrauschen. Sowohl für den fehlerfreien, aber rauschbehafteten Fall als auch für den Fehlerfall mit einem groben Fehler auf einem der Satellitenmessungen wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der resultierenden Metrik zugrunde gelegt, und mit Hilfe eines Hypothesentests die Entscheidung getroffen, ob ein grober Fehler vorliegt. Mit Hilfe dieser Metrik kann daher eine Entscheidung bezüglich eines vorhandenen systematischen Fehlers getroffen werden. Der eindimensionale Wert wird mit einer vorgewählten Entscheidungsschranke (Threshold) verglichen. Falls die Schranke durch den Wert überschritten wird, wird dies als grober Fehler in einem der enthaltenen Messwerte interpretiert. Dieser beschriebene Entscheidungsprozeß ist identisch zum DIA-Verfahren und als solcher bereits in den beschriebenen Positionsbestimmungsprozessoren implementiert.

Eine weitergehende Anwendung von RAIM ist jedoch die Angabe der aus der Testparametrierung resultierenden *Protection Levels* [Walther-95] die eine Oberschranke für den verbleibenden Positionsfehler innerhalb einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit angeben. Diese Angabe basiert auf der Annahme, dass der RAIM- oder DIA-Algorithmus einen auftretenden groben Fehler in einer der Satellitenmessungen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erkennt, sofern der Fehler eine bestimmte Schranke (Threshold) übersteigt.

##### **EINGANGSDATEN:**

Der RAIM-basierte Algorithmus zur Bestimmung des VPL und HPL ist innerhalb des Positionslösungs-Algorithmus implementiert und nutzt dessen (teilweise nur intern verfügbaren) Messwerte und berechneten Größen. Die Eingangsdaten für RAIM sind die gemessenen Pseudorange-Größen sowie eine errechnete Positionslösung.

##### **AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung werden die berechnete Referenzposition und die errechneten RAIM-basierten Protection Levels in der horizontalen Ebene sowie in der vertikalen Achse ausgegeben. Zusätzlich werden nachgelagert noch die Identifikationsnummern der verwendeten Satellitensignale sowie die intern zur Berechnung der Protection Levels verwendeten  $H_{Slope}$ - und  $V_{Slope}$ -Werte für diese ausgegeben.



**Tab. 4-17 Ausgangsdaten des RAIM-Moduls**

	<b>Kennung</b>	<b>Dateninhalt</b>
1	timeTag	Zeitstempel
2	x	Berechnete Position (x)
3	y	Berechnete Position (y)
4	z	Berechnete Position (z)
5	t	Berechnete Systemzeit
6	HPL	Horizontales Protection Level
7	VPL	Vertikales Protection Level
8	max[Hslope]	Größter „Hslope“-Wert des Satelliten
9	max[Vslope]	Größter „Vslope“-Wert des satelliten
10	nrSVs	Anzahl verwendeter SVs
11	PRNs	Liste der Identifikationsnummern verwendeter Satelliten
12	Hslopes	zugehörige „Hslope“-Werte
13	Vslopes	zugehörige „Vslope“-Werte

Alle diese Ausgangsdaten werden mit der EVnet-eigenen Broadcast-Methodik als Stream zur Verfügung gestellt und können so in der GUI in Echtzeit dargestellt werden.

#### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

Die Berechnung der HPL- und VPL-Werte ist eng mit der Fehlerbestimmung über den globalen statistischen Test verknüpft. Die angenommenen Wahrscheinlichkeiten eines unbemerkten Satellitenfehlers sowie eines falschen Alarms,  $P_{MD}$  und  $P_{FA}$ , müssen daher mit denen der statistischen Tests übereinstimmen, damit die angegebene Fehlerschranke auch mit dem vorgegebenen Restrisiko eingehalten wird.

#### **FUNKTIONSWEISE:**

Entsprechend der durchgeführten statistischen Tests wird die zugehörige HPL/VPL-Angabe aus den Informationen über die momentane Satellitengeometrie und die benutzten Parameter für die statistischen Tests berechnet. Dabei beziehen sich die HPL- und VPL-Werte auf ein sog. *Integritätsrisiko*  $P_{MD}$ , das die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung der gegebenen Fehlerschranke durch den tatsächlichen Positionsfehler bezeichnet:

$$P_{MD} = P(\varepsilon_H > HPL) + P(\varepsilon_V > VPL)$$

$\varepsilon_H$  : Horizontaler Positionsfehler (RMS)

$\varepsilon_V$  :Vertikaler Positionsfehler

**Gl. 4-24**

Im RAIM- oder DIA-Algorithmus wird für jede Epoche eine Entscheidung anhand eines Hypothesentests darüber getroffen, ob ein grober Fehler (Bias) in einer der Satellitenmessungen vorliegt. Diese Entscheidung legt zugrunde, dass die verwendete Metrik im fehlerfreien Fall einer zentralen Chi<sup>2</sup>-Verteilung, und im Fall eines groben Fehlers einer nichtzentralen Chi<sup>2</sup>-Verteilung folgt.

Die Angabe dieser Fehlerschranke basiert auf der Annahme, dass die Entscheidung über einen erkannten Fehler in den Satellitenmessungen mit einer bekannten Wahrscheinlichkeit korrekt getroffen wird, wenn der grobe Fehler einen bestimmten Wert übersteigt (*MDB* - minimum detectable bias). Für jeden Satellitenfehler resultiert ein derartiger Bias in einem individuell hohen Positionsfehler in der Vertikalen und in der Horizontalen. Dieser lineare

Zusammenhang wird als  $H_{Slope}$  bzw.  $V_{Slope}$  bezeichnet und für alle verwendeten Entfernungsmessungen nach folgender Bildungsvorschrift berechnet:

$$V_{Slope_i} = \frac{|K_{3i}| \sigma_i}{\sqrt{1 - P_{ii}}} \quad \text{Gl. 4-25}$$

Hierbei ist P die gewichtete Pseudoinverse:

$$K = G(G^T W G)^{-1} G^T W \quad \text{und} \quad P = G \cdot K \quad \text{Gl. 4-26}$$

Aus dem jeweils höchsten  $H_{Slope}$ - bzw.  $V_{Slope}$ -Faktor resultiert dann der höchste Positionsfehler für die Horizontalebene und die Vertikalachse, der mit einem nicht zuverlässig detektierbarem groben Fehler auf einem der Satelliten einhergeht:

$$VPL_{FD} = \max[V_{slope}] T(N, P_{FA}) + k(P_{MD}) WVDOP$$

$$HPL_{FD} = \max[H_{slope}] T(N, P_{FA}) + k(P_{MD}) WHDOP', \quad \text{Gl. 4-27}$$

wobei hier der Threshold  $T$  vom statistischen Test (DIA, siehe Kap. 4.4.6.1) übernommen wird und durch Freiheitsgrad der Chi-Quadrat-Verteilung (Satellitenanzahl-4) und der False-Alarm-Rate  $P_{FA}$  bestimmt wird.

Der Inflationsfaktor  $k(P_{MD})$  ist die Anzahl der Standardabweichungen, die eine Wahrscheinlichkeit  $P_{MD}$  einschließt. Für eine gewünschte Missed Detection Rate von  $P_{MD} = 10^{-7}$  beträgt z.B.  $k(P_{MD}) = 5.327$ . Schließlich wird mit den gewichteten DOP-Faktoren

$$WVDOP = \sqrt{\left[ (G^T W G)^{-1} \right]_{33}}$$

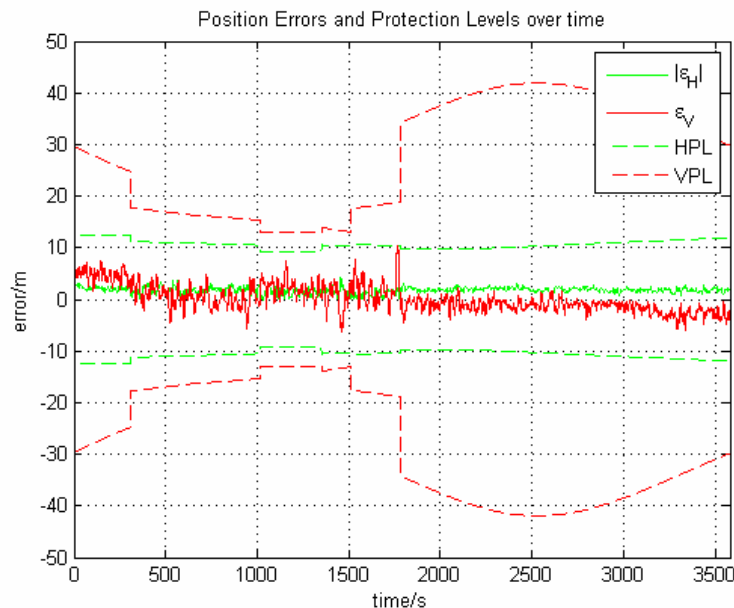
$$WHDOP = \sqrt{\left[ (G^T W G)^{-1} \right]_{11} + \left[ (G^T W G)^{-1} \right]_{22}} \quad \text{Gl. 4-28}$$

der Geometrie der Satellitenkonstellation Rechnung getragen.

Für den Positionsfehler, der eine der beiden so errechneten *Protection Levels* überschreitet, gilt höchstens die gleiche Auftretenswahrscheinlichkeit wie für die Überschreitung des zugrunde liegenden Biases. Damit ist den Protection Levels dasselbe *Integritätsrisiko* zugeordnet wie der in den statistischen Tests vorgewählten *Probability of Missed Detection*.

#### **VALDIERUNGSBEISPIEL:**

Anhand von aufgezeichneten Messdaten einer ortsfesten Station wurde der Algorithmus validiert. Die Messung zeigt den tatsächlichen Positionsfehler der Station im Verhältnis mit der dazu angegeben Fehlerschranke. Die Positionsfehler überschreiten im Valdierungsbeispiel in keinem der ca. 15,000 Messungen die Protection Levels; dies entspräche einem Integritätsrisiko von Null.



**Abb. 4-67 Positionsfehler und Protection Levels**

#### 4.4.7 SW-Entwicklung GUI

Für das Überwachung von Prozessoren in Echtzeit wurde diverse grafische Nutzerinterfaces (GUI) entwickelt. Die Entwicklung dieser Applikationen orientierte sich dabei am Basiskonzept für das GNSS- und GBAS-Echtzeitmonitoring (siehe Abb. 4-43).

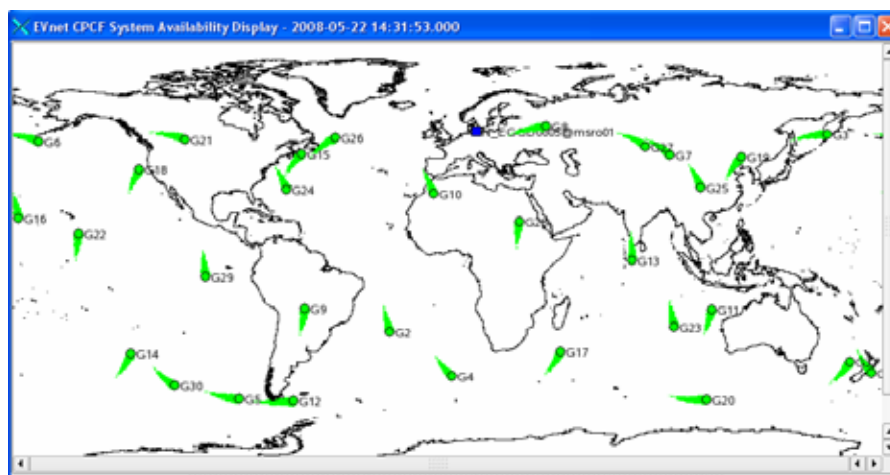
Folgende Daten bzw. Datenprodukte werden derzeit für das Monitoring verwendet:

- Verfügbarkeit von Rohdaten für die Prozessierung → Level 0 Produkt
- Wertebereich der Geometrischen Konstellation (DOP) → Level 0 Produkt
- Bewerte Signalgrößen (Trägerphase, Range Signalamplitude, Multipath, TEC ) → Level 0 und Level 1 Produkt
- Positionsfehler des GBAS Bodensegments → Level 2 Produkt

Die grafischen Nutzerinterfaces wurden auf Basis von Qt und LabView entwickelt.

#### **GUI SATELLITENVERFÜGBARKEIT - ROHDATENVERFÜGBARKEIT**

Für die Darstellung der Rohdatenverfügbarkeit aller sichtbaren Satelliten wurde ein Konglomerat aus Prozessor und grafischer Oberfläche entwickelt. Das Programm dient dazu, einem Operator die Verfügbarkeit sowohl real messbarer als auch vorprozessierter Satellitendaten darzustellen. In erster Instanz ist es einem Operator durch Nutzung dieses Prozessors damit möglich, die gegenwärtige Satellitenkonstellation projiziert auf eine Weltkarte dargestellt zu bekommen und einen Polarplot des aktuellen Satellitenposition (Elevation und Azimut) zu erhalten. Parallel dazu ist das Tool in der Lage, auf der Grundlage dekodierter und prozessierter Sensordatenströme die Überprüfung der linkspezifischen Vollständigkeit dieser Daten vorzunehmen. Fehlen für einen Satelliten Daten, die aber aus der Vorhersage als verfügbar erwartet werden, so wird dies durch unterschiedliche Farbuordnungen der Satelliten im grafischen Display deutlich gemacht.



**Abb. 4-68 Weltkartenplot zur Darstellung des Satellitenstatus aller im Orbit verfügbaren GNSS-Satelliten (hier GPS)**

Die Position auf der Weltkarte entspricht dabei der auf die Erdoberfläche abgebildeten Fußpunkt der Flugbahn des Satelliten. Die Farbzuordnung (grün, rot) signalisiert, ob der aus den Almanach- oder Ephemeridenfiles extrahierte Health-Zustand des Satelliten auf healthy (grün) oder auf unhealthy (rot) gesetzt ist. Der Schweif des Satelliten zeigt die Bewegungsrichtung bzw. die zurückgelegte Bahn über die letzten 30 min an. Zudem zeigt ein blaues Quadrat den Standort der ALEGRO GBAS Bodenstation an.

Bewegt der Operator den Mauszeiger über das blaue Quadrat öffnet sich ein weiteres Fenster, welches den aktuellen Satellitenzustand der im Umfeld der ALEGRO GBAS Bodenstation sichtbaren Satelliten als Polarplot darstellt (Abb. 4-69).

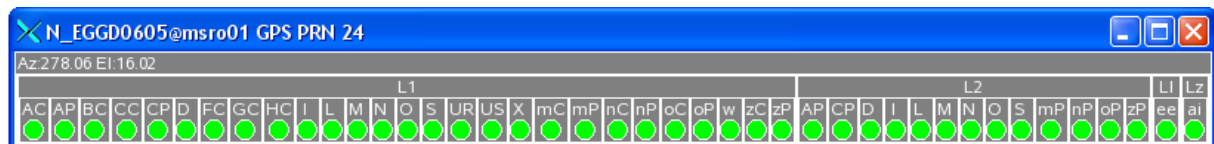


**Abb. 4-69 Polarplot an der GBAS-Referenzstation sichtbaren GPS-Satelliten sowie farblich kodierte Datenvollständigkeit bestimmt durch A-GPAF**

Dem Nutzer wird anhand der Farben des Satelliten verdeutlicht, inwieweit Messdaten an der A-GPAF anliegen und inwieweit diese Vorprozessierungsergebnisse bereitstellen konnte. Die einzelnen Farben haben dabei folgende Bedeutung:

- grau → Satellit befindet sich unterhalb der relevanten Elevationsmaske von 5°
- grün → Satellit wird getrackt, Empfänger und/oder Vorprozessor liefert vollständige Daten
- gelb → Satellit wird getrackt, Empfänger und/oder Vorprozessor liefert aber nur unvollständige Daten
- rot → Satellit müsste eigentlich getrackt werden, Empfänger liefert aber keine Daten

Der Schweif des Satelliten zeigt auch hier die Bewegungsrichtung bzw. die zurückgelegte Bahn der letzten 30 min an. Am unteren linken Bildrand befindet sich eine Azimut- und Elevationsanzeige der aktuellen Cursorposition der Maus. Bewegt man die Maus direkt auf einen Satelliten (Kernpunkt oder Schweif), so öffnet sich ein Popup-Fenster, welches den aktuellen Zustand der empfangenen Signalgrößen repräsentiert.

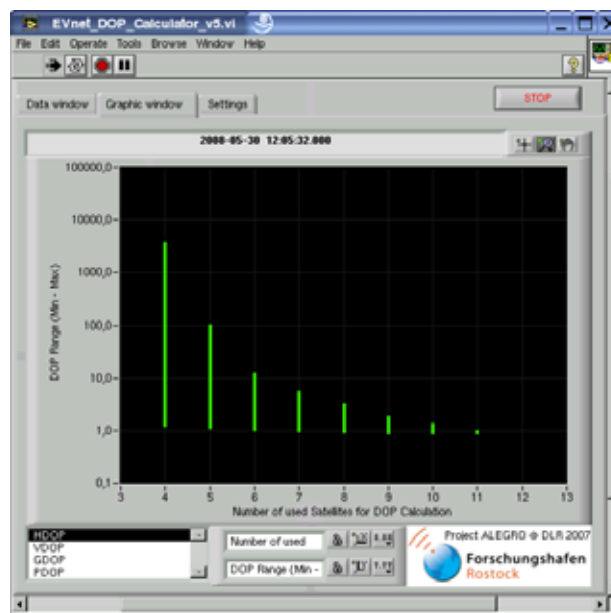


**Abb. 4-70 Pop-Up Information zur Darstellung der Vollständigkeit akquirierter Signalgrößen (GPS PRN 24)**

Das Fenster gibt in der Statusleiste Auskunft über den Sensordatenstrom sowie die PRN des ausgewählten Satelliten. Zudem wird der jeweils aktuelle Azimut- und Elevationswinkel ausgegeben (Zeile 1). Danach erfolgt in Zeile 2 eine Trennung entsprechend der akquirierfähigen Trägerfrequenzen (bei GPS z.B. L1 und L2) sowie von trägerfrequenzunabhängigen Zusatzgrößen wie Elevations- und Azimutwinkel. Die farbliche Zuordnung ist für den Operator so gestaltet, dass ein grüner Punkt die Bereitstellung der entsprechenden Signalgröße signalisiert, ein weißer Punkt hingegen darauf hinweist, dass die entsprechende Größe entweder nicht vom Empfänger geliefert wird oder nicht durch einen Prozessor bereitgestellt werden konnte.

### **GUI GEOMETRISCHE KONSTELLATION (DOP)**

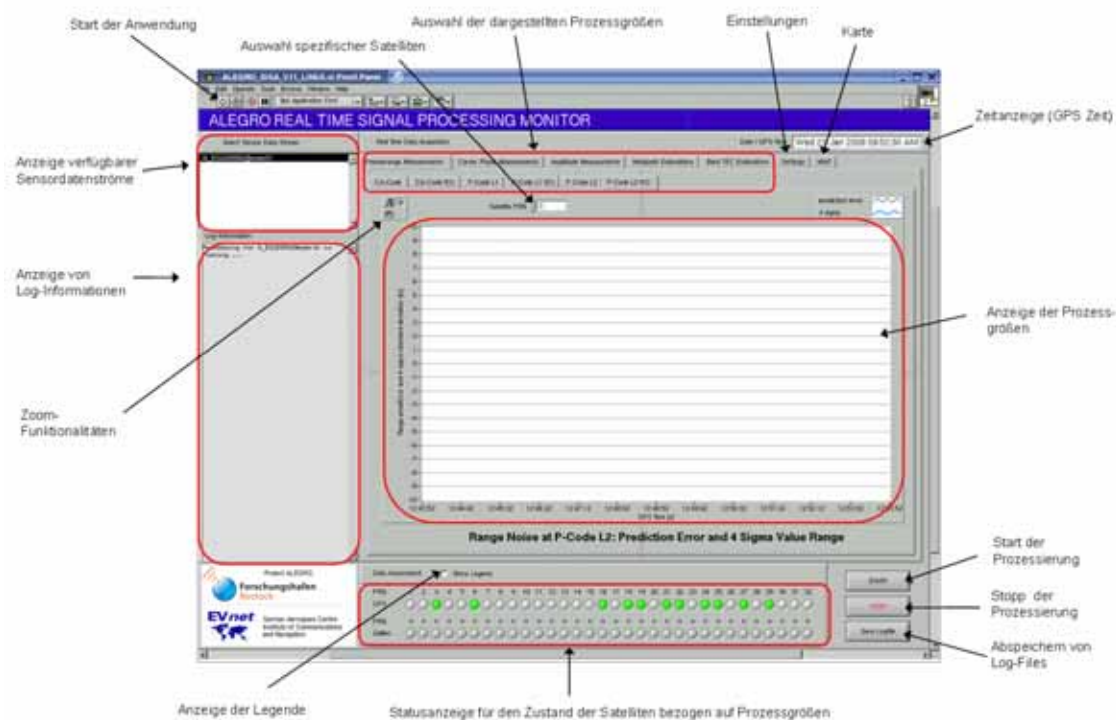
Das dafür entwickelte GUI dient zur Darstellung des aktuell zulässigen Wertebereiches für DOP Größen. DOP Größen (Dilution of Precision), wie HDOP, PDOP, VDOP oder GDOP sind geometrische Qualitätskenngrößen, die eine Aussage darüber zulassen, inwieweit die aktuelle Satellitengeometrie die Güte der Positionslösung bestimmt. Niedrige DOP-Werte um 1 weisen auf eine sehr gute Satellitengeometrie hin. DOP Werte bis 3 führen in der Regel zu noch akzeptablen Positionierungsergebnissen. DOP-Werte größer 6 weisen hingegen auf eine schlechte Satellitengeometrie hin, die zu einer deutlichen Verschlechterung der zu erwarteten Positionsgenauigkeit führt. Das DOP-GUI gibt dem Nutzer für alle theoretisch möglichen Kombinationen der Satellitengeometrie den MIN-MAX Wertebereich aller DOP-Werte aus. Der Prozessor kann daher im Vergleich mit einem aktuell vom Empfänger oder einem Prozessor berechneten DOP Wert dazu genutzt werden, dessen Plausibilität zu überprüfen.



**Abb. 4-71 Grafische Ausgabe der DOP-Werte**

### GUI BEWERTUNG VON SIGNALKENNGRÖßEN (SIGNAL IN SPACE ASSESSMENT – SISA)

Zur Bewertung von Signalkenngrößen wurde das SISA-GUI aus Abb. 4-72 entwickelt.



**Abb. 4-72 Startfenster zur Anzeige prozessierter Signale und Signalkenngrößen**

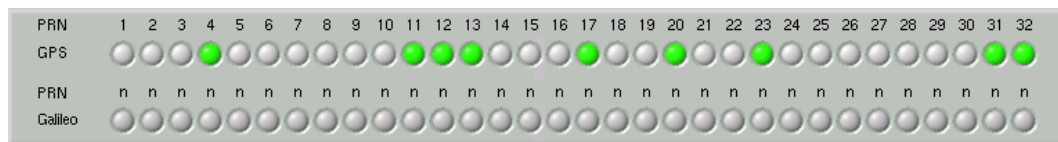
Folgende Signalkenngrößen lassen sich mittels dieses grafischen Nutzerinterfaces monitoren:

**Tab. 4-18 Darstellbare Signalkenngrößen**

ID	Bedeutung
flagAMP_L1	Qualitätsflag der Amplitudenmessung auf L1 (Code)
flagPHASE_L1	Qualitätsflag der Amplitudenmessung auf L1 (Phase)
flagPHASE_L2	Qualitätsflag der Amplitudenmessung auf L2 (Phase)
obsA1C	Amplitude (CA-Code) auf L1
obsA1P	Amplitude (P-Code) auf L1
obsA2P	Amplitude (P-Code) auf L2
obsazi	Azimuthwinkel
obsB1C	Signalstärke (CA-Code) auf L1
obsC1C	Range Messung (CA-Code) auf L1
obsC1P	Range Messung (P-Code) auf L1
obsC2P	Range Messung (P-Code) auf L2
obsD1_	Doppler auf L1
obsD2_	Doppler auf L2
obsele	Elevationswinkel
obsF1C	normalisierter Amplitudenprediktionsfehler (CA-Code) auf L1
obsG1C	Rauschvarianz der Amplitude (CA-Code) auf L1
obsH1C	Prediktionsfehler der Amplitude (CA-Code) auf L1
obsI1_	Ionosphärische Phasenverzögerung auf L1
obsI2_	Ionosphärische Phasenverzögerung auf L2
obsi?_	improved TEC
obsL1_	Phasenmessung auf L1
obsL2_	Phasenmessung auf L2
obsm1C	Quality assessed CA code auf L1
obsm1P	Quality assessed P code auf L1
obsM1_	Quality Assessed Phase on L1
obsm2P	Quality assessed P code auf L2
obsM2_	Quality Assessed Phase on L2
obsn1C	CA-Code Prediction Error on L1
obsn1P	P-Code Prediction Error on L1
obsn2P	P-Code Prediction Error on L2
obso1C	CA-Code Noise Variance on L1
obso1P	P-Code Noise Variance on L1
obso2P	P-Code Noise Variance on L2
obsr?_	un-noisy TEC rate
obsS1_	TBD
obsS2_	TBD
obss?_	smoothed TEC
obst?_	mean TEC rate
obsU1R	single UERE based on raw observation on L1

obsU1S	single UERE based on smoothed observation on L1
obsU2S	single UERE based on smoothed observation on L2
obsu?_	standard deviation of TEC rate
obsW1_	Multipath on CA-L1
obsX1_	single smoothed range on L1
obsz1C	Accumulated Clock correction (CA-Code) on L1
obsz1P	Accumulated Clock correction (P-Code) on L1
obsz2P	Accumulated Clock correction (P-Code) on L2
predERROR_L1	Phase prediction error L1
predERROR_L2	Phase prediction error L2
sigNOISE_L1	Phase sigma noise L1
sigNOISE_L2	Phase sigma noise L2

Über die Statusanzeige kann sich der Operator jederzeit einen Überblick über die Güte der prozessierten Signale verschaffen. Signalausfälle oder Überschreitungen von Grenzwerten werden durch farbliche Codierung dem Operator dargestellt.



**Abb. 4-73 Statusanzeige prozessierter Signale und Signalkenngrößen**

Die Anzeige ist für GPS voll operabel und für Galileo bereits vorbereitet. Folgende Signalzustände werden signalisiert:

**grau** → Satellit befindet sich nicht im Sichtbarkeitsbereich

**grün** → alle Daten entsprechen den Normbereichen

**gelb** → Normbereich verlassen → Prozessor befindet sich in einer Re-Akquisitionsphase

**rot** → Grenzbereich überschritten → Prozessor liefert keine Daten

Dem Operator obliegt es über die angebotene Auswahlleiste spezifische Signalgrößen bzw. abgeleitete Größen auszuwählen. Folgende Größen können für die Darstellung ausgewählt werden:



**Tab. 4-19 Darstellungsgrößen des SISA GUI**

Signaltyp	Größe	Beschreibung
Pseudorange	CA-Code	Prediktionsfehler <sup>4</sup> und 4Sigma-Wert <sup>5</sup> des Rauschens auf CA-Code
Pseudorange	P-Code L1	Prediktionsfehler und 4Sigma-Wert des Rauschens auf P-Code L1
Pseudorange	P-Code L2	Prediktionsfehler und 4Sigma-Wert des Rauschens auf P-Code L2
Trägerphase (Carrier Phase)	Flag Status	Flagstatus der Prozessierung der Trägerphase für L1 und L2
Trägerphase (Carrier Phase)	L1 PE (predError & SigNoise)	Prediktionsfehler und 3.4Sigma-Wert des Rauschens der L1 Phase
Trägerphase (Carrier Phase)	L2 PE (predError & SigNoise)	Prediktionsfehler und 3.4Sigma-Wert des Rauschens der L2 Phase
Signalamplitude	Raw Amplitude	gemessene Rohamplituden des Empfängers
Signalamplitude	PredError & sigNoise	Prediktionsfehler und 4Sigma-Wert der Amplitude auf CA-Code
Signalamplitude	NpredError	normalisierter Prediktionsfehler der Amplitude auf CA-Code
Mehrwegeeinfluss (Multipath)	CA L1 Kombination	geschätzter Mehrwegefehler auf Basis der CA-L1 Kombination
Ionosphärenfehler	Slant TEC Rate	geschätzte Slant TEC rate
Ionosphärenfehler	Improved TEC	erweitertes Verfahren der TEC Bestimmung

Alle Größen können entweder für alle Satelliten in einer Momentanbalkendarstellung oder im zeitlichen Verlauf (einige Fenster bieten das für alle Satelliten, manche nur für einzelne) Satelliten dargestellt werden. Nachfolgende sind für die Größen

- Signalamplitude aller Satelliten über der Zeit
- Phasenrauschen der Trägerphase auf L1 für alle Satelliten als Momentanwertdarstellung
- Phasenrauschen der Trägerphase auf L1 für einen spezifischen Satelliten über der Zeit
- Flagstatus der Trägerhasenprozessierung zur Erkennung von Phasensprüngen (Cycle Slips) auf L1 und L2
- Abschätzung des Mehrwegefehlers (Multipath) auf L1 für alle Satelliten über der Zeit

exemplarisch dargestellt:

<sup>4</sup> ein Prediktionsfehler ist gekennzeichnet durch die Differenz zwischen vorausberechnetem (prädizierten) und gemessenen Wert

<sup>5</sup> symbolisiert die Vertrauensgrenze nach Normal- bzw. Gauß-Verteilung (4 Sigma entsprechen z.B. einem Vertrauensbereich von 99,9937 % der gemessenen Werte)

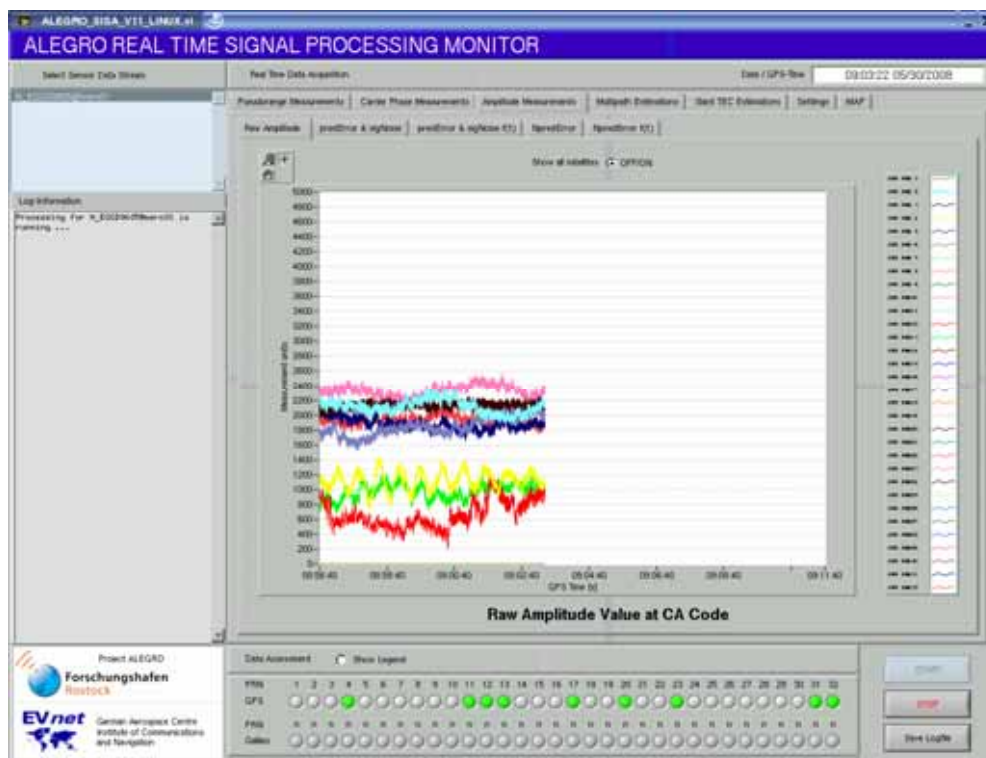


Abb. 4-74 Anzeige der gemessenen Signalamplitude (Messgröße) des CA-Codes für alle Satellitenlinks über der Zeit

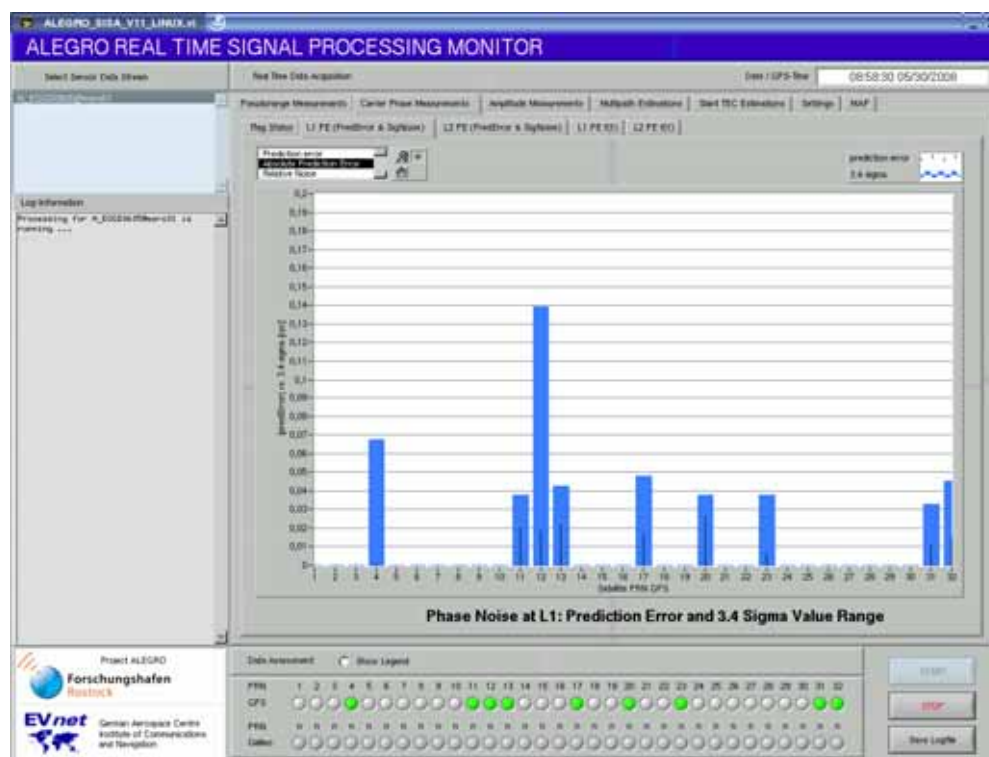


Abb. 4-75 Anzeige des Phasenrauschen auf L1 für alle Satellitenlinks als Momentanwertdarstellung (schwarz) und der Kurzzeitstandardabweichung (blau)

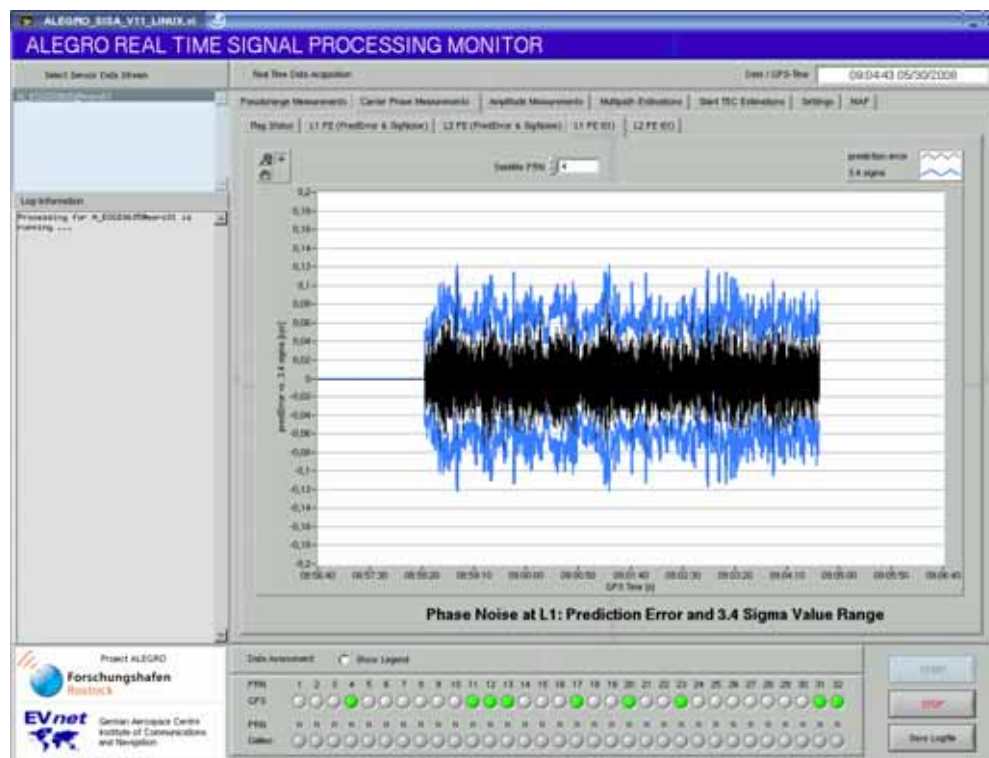


Abb. 4-76 Anzeige des Phasenrauschen auf L1 für einen spezifischen Satelliten (schwarz) und der Kurzzeitstandardabweichung (blaue Hüllkurve) über der Zeit

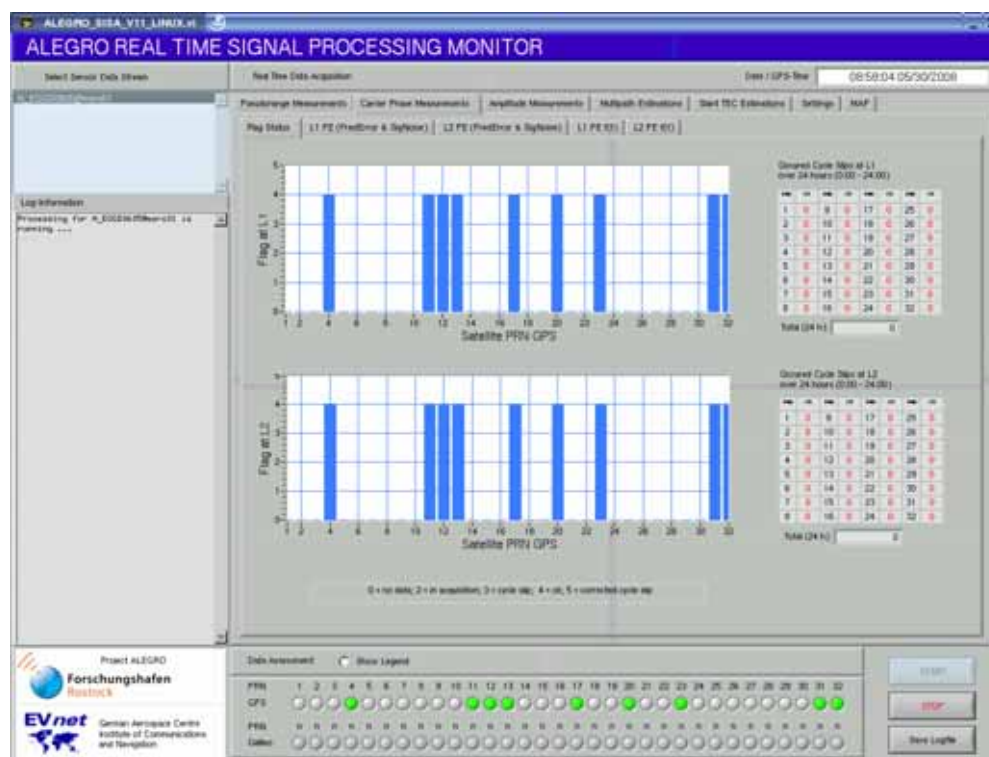
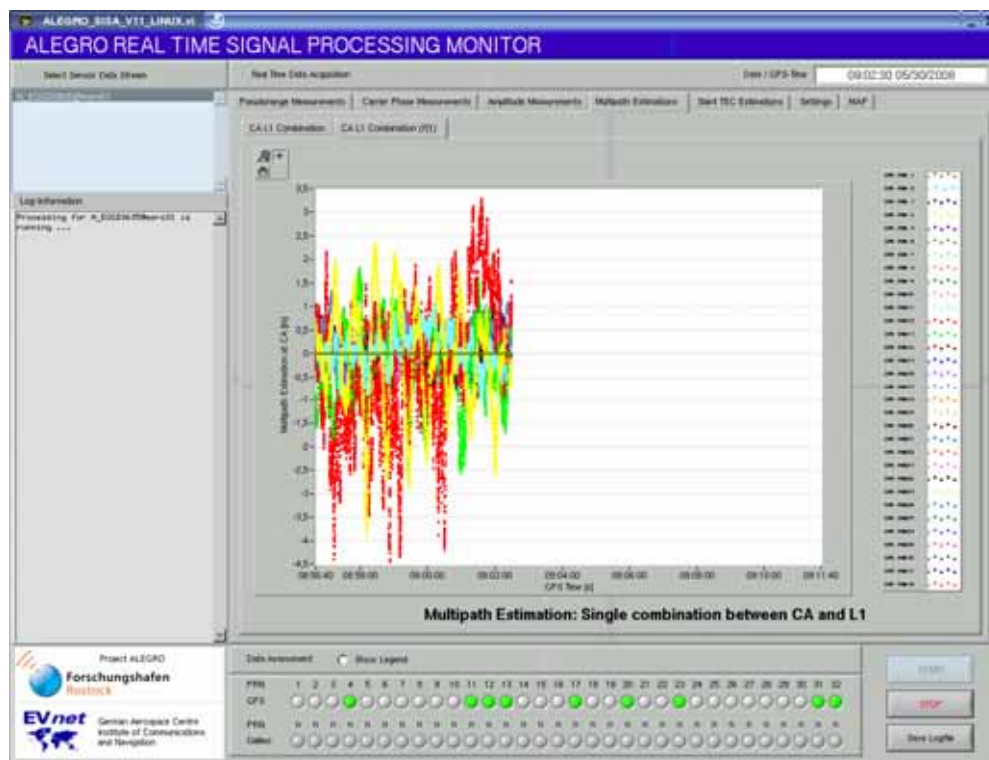


Abb. 4-77 Flagstatus der Trägerphaseprozessierung auf L1 und L2 incl. der Anzeige aufgetretener Cycle Slips über 24 h (0.00 – 24.00 Uhr GPS-Zeit)

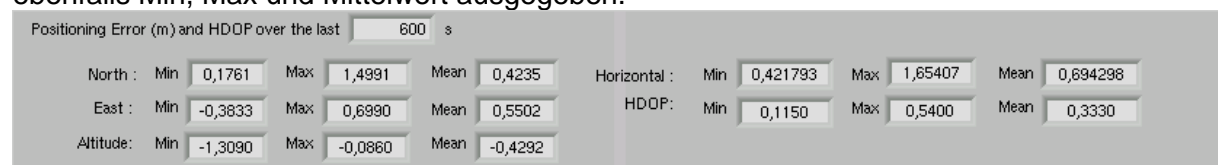


**Abb. 4-78 Anzeige des abgeschätzten Mehrwegefehlers aller linkspezifischen Messwerte von L1 über der Zeit**

## GUI POSITIONSGENAUIGKEIT UND POSITIONSFehler

Die GUI Anwendung in Abb. 4-79 dient zur Darstellung positionsrelevanter Größen der GBAS Bodenstation auf der Grundlage einer codebasierten Lösung mit Trägerphasenglättung.

Der Operator kann sich über Statusanzeigen statistische Kenngrößen der Positionierung ausgeben lassen. Angezeigt werden der Minimal- (Min), Maximal- (Max) und Mittelwert (Mean) für den Fehler in Nord- (North) und Ostrichtung (East), in der Höhe (Altitude) sowie in der horizontalen Ebene (2D). Zudem werden für den geometrischen Qualitätswert HDOP ebenfalls Min, Max und Mittelwert ausgegeben.



Dem Operator obliegt es über die angebotene Auswahlliste spezifische Darstellungsarten für den Positionsplot auszuwählen. Folgende Größen können für die Darstellung ausgewählt werden:

- 2D Error Plot → Horizontaler Positionsfehler (Abb. 4-80) als Punktwolke
- 2D Error Chart → Horizontaler Positionsfehler (Abb. 4-81) über der Zeit
- 3D Error Chart → Dreidimensionaler Positionsfehler (Abb. 4-83) über der Zeit

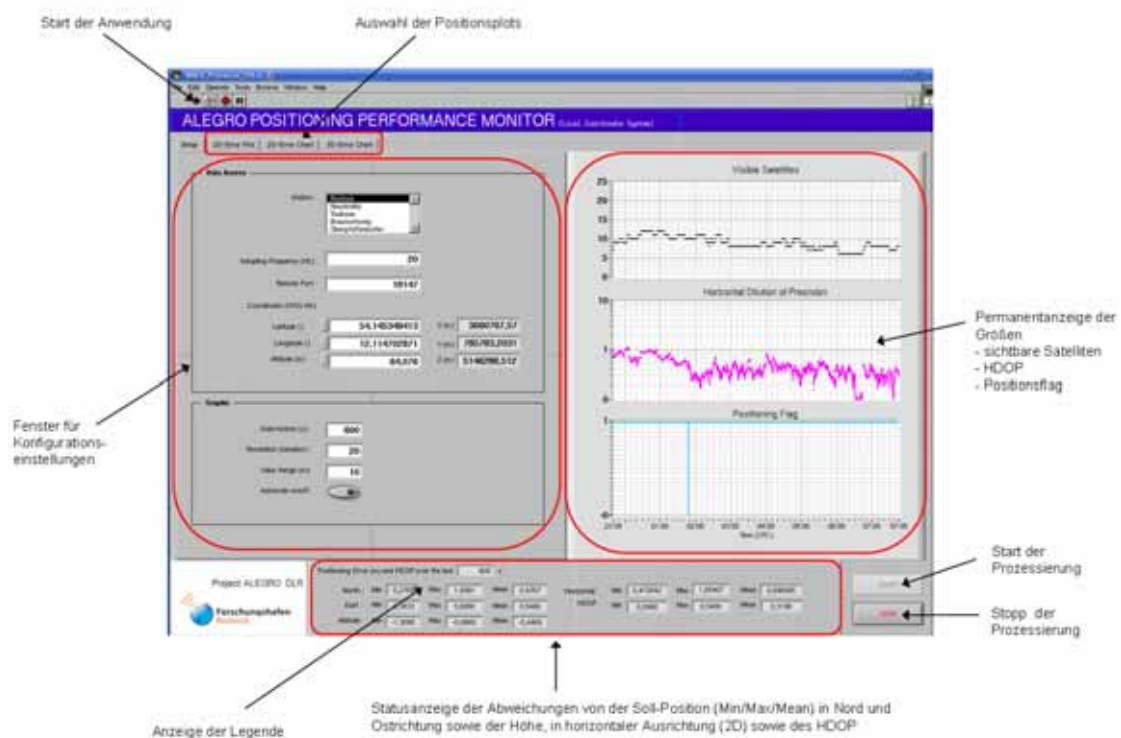
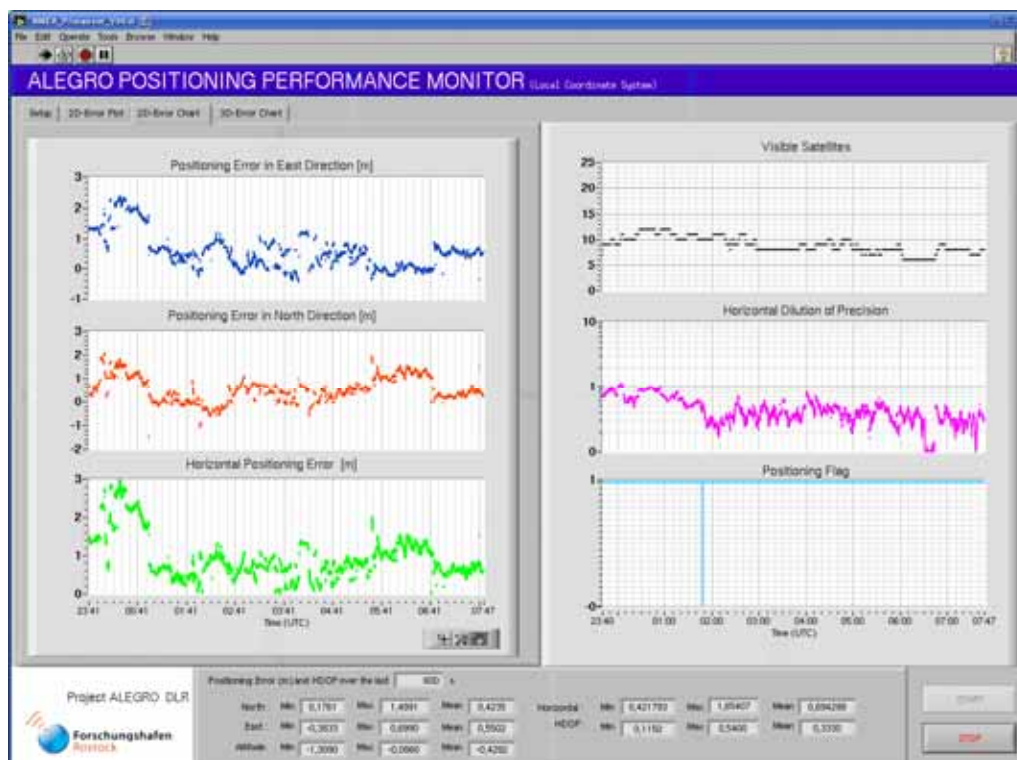


Abb. 4-79 Startfenster zur Anzeige positionsrelevanter Größen der ALEGRO Referenzstation

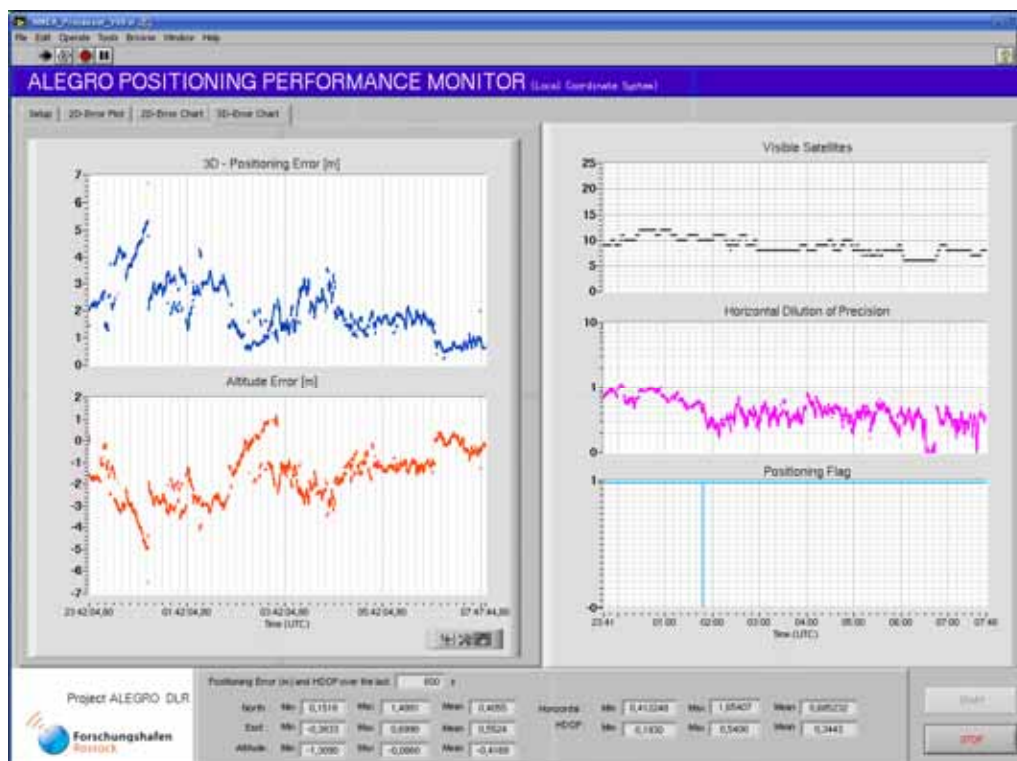


Abb. 4-80 Horizontaler Positionsfehler (Punktwolke) sowie Anzahl sichtbarer Satelliten, HDOP-Werte und Verfügbarkeit der Positionslösung über der Zeit





**Abb. 4-81** Horizontaler Positionsfehler und richtungsabhängige Fehleranteile sowie Anzahl sichtbarer Satelliten, HDOP-Werte und Verfügbarkeit der Position über der Zeit



**Abb. 4-82** Dreidimensionaler Positionsfehler und höhenspezifischer Fehleranteil sowie Anzahl sichtbarer Satelliten, HDOP-Werte und Verfügbarkeit der Position über der Zeit

#### **4.4.8 SW-Entwicklung RTCM 3.0-Generator**

Um Portabilität und Interoperabilität zur existierenden RTK-Empfängern und während der Entwicklung Vergleichs- und Testmöglichkeiten zu haben, wurde eine Softwarekomponente entwickelt, die einen RTCM-Datenstrom (3.0) unter Nutzung der im EVNet Framework verwendeten Softwareschnittstellen erzeugt. In Erwartung der mit zu übertragenden GALILEO-Signale und um phasenbasiertes DGNSS zu unterstützen, wurde die Entwicklung auf RTCM 3.0 fokussiert.

Der Generator ist eine Anwendung eines im Rahmen von ALEGRO entstandenen allgemeinen Moduls (codec) zur binären Kodierung und Dekodierung. Bei der Verwendung des codec Moduls wird ein Datenformat strukturell ähnlich beschrieben, wie eine Spezifikation. Die gewählte Implementierung hat den Nachteil, dass sie nicht optimal bzgl. der Ausnutzung der Rechenleistung ist. Während des Echtzeitbetriebs werden allerdings nur wenige Kilobyte Ergänzungsdaten pro Zeitschritt erzeugt, so dass dieser Nachteil in keinem Verhältnis zu den Vorteilen steht.

RTCM 3.0 ist in Bezug auf GALILEO noch kein endgültig spezifiziertes Datenformat. Deshalb sind Anpassungsarbeiten, die RTCM-Erweiterungen 3.x entsprechen [RTCM3-2008], zukünftig in den Generator einzufügen. Parallel zum Generator wurde ein formatkompatibler Dekoder (siehe Kap. 4.4.8) entwickelt.

##### **AUFGABE:**

Aus GNSS-Daten werden Ergänzungsinformationen im RTCM-Format (3.0) erzeugt.

##### **EINGANGSDATEN:**

GNSS-Daten (siehe auch RTCM-Standard, [RTCM3-2008])

##### **AUSGANGSDATEN:**

Binärer RTCM-Datenstrom (3.0) basierend auf den Nachrichtentypen 1004,1005 und 1008 entsprechend [RTCM3-2008].

##### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

- refPosInterval – Zeitintervall zwischen den Zeitpunkten, an denen der Generator die Empfänger-Referenzposition ausgibt. (Standard 10s)
- antennaInterval – Zeitintervall zwischen den Zeitpunkten, an denen der Generator die Antennenparameter ausgibt (Standard 10s)

##### **FUNKTIONSWEISE:**

Der Generator arbeitet in zwei Schritten: In einem ersten Schritt werden die zu kodierenden Daten in eine innere nachrichtenspezifische Form gebracht, und in einem zweiten Schritt wird die spezifische Nachricht in eine RTCM Transport Layer Nachricht (3.0) eingebettet.

##### **VALIDIERUNGSBEISPIEL:**

Folgende Tests wurden im Rahmen der Abnahme des Generators erfolgreich durchgeführt:

- **Test auf Rekonstruktion und Vollständigkeit:**

Da der RTCM-Generator (3.0) ein verallgemeinertes Kodier-/Dekodier-Modul nutzt, konnte getestet werden, ob alle kodierten Informationen auch wieder exakt und vollständig dekodierbar sind. Dazu wurden unter anderem Korrekturdaten genutzt, die von Bundesamt für Kartographie (BKG) im Internet in Echtzeit bereitgestellt werden.

- **Empfängerkompatibilität:**

Der RTCM-Generator (3.0) wurde mit Empfängern verschiedener Hersteller getestet, die über einen Eingang über RTCM-Korrektursignale (3.0) verfügen und diese für eine phasenbasierte DGNSS-Positionsbestimmung nutzen. Alle Empfänger konnten die selbst erzeugten RTCM-Daten nutzen und eine phasenbasierte DGNSS-Positionslösung mit fixierten Mehrdeutigkeiten bestimmen.

▪ **Kompatibilität bzgl. der geodätisch erreichbaren Genauigkeit:**

Aus RINEX-Daten erzeugte RTCM-Daten wurden wieder dekodiert, in das RINEX-Format gewandelt und mit einer Geodätischen Postprozessierungsprogramm (Trimble TTC) zur Bestimmung von Trajektorien eingesetzt. Die Ergebnisse stimmten mit denen überein, die bei direkter Prozessierung der RINEX-Daten erhalten werden.

## **4.5 Aufbau des experimentellen GBAS- Nutzersegments**

### **4.5.1 Architekturkonzept**

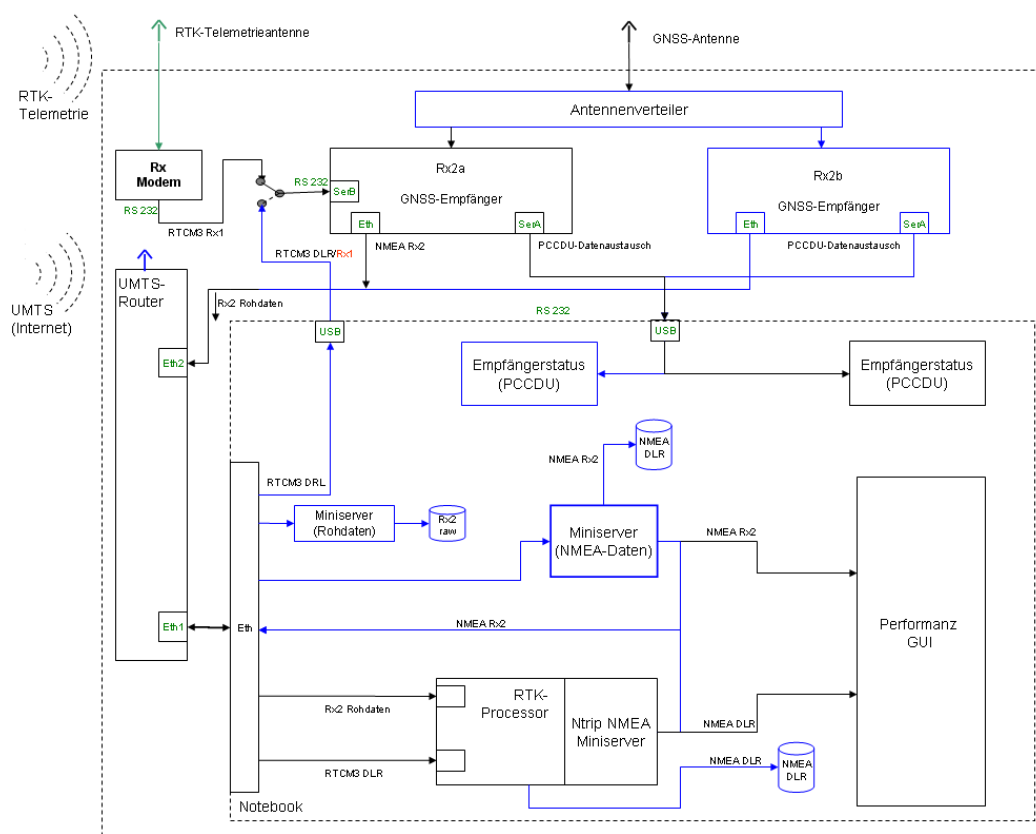
Die Anforderungen an das GBAS-Nutzersegment ergeben sich durch Untersetzung der in Kapitel 1 genannten Projektziele sowie unter Bezug auf das in Kapitel 4.3.1 erläuterte Architekturdesign des gesamten GBAS-Segmentes.

Von besonderer Relevanz für das Design der Komponenten der GBAS-Bordeinheit war dabei, dass

- (a) die zum Betrieb der GBAS-Bordeinheit erforderlichen Hardwarekomponenten sowie ihre notwendige Verbindungen untereinander einem robusten Aufbau unterliegen mussten;
- (b) die GBAS-Bordeinheit den Anforderungen in den Experimentier-, Validierungs-, Demonstrations- und Betriebsphasen genügen musste (universelle Einsetzbarkeit);
- (c) die GBAS-Bordeinheit so zu entwickeln war, dass sie den Nutzeransprüchen, (insbesondere in Folgeprojekten) unter Kosten- und Aufwandsaspekten genügen musste (Nachhaltigkeit und effektiver Einsatz von Ressourcen);
- (d) die Softwarekomponenten einer GBAS-Bordeinheit auf einem einzigen Rechnersystem der GBAS-Bordeinheit unterzubringen waren;
- (e) die GBAS-Bordeinheit so zu entwickeln war, dass sie in der Lage ist, Standard-RTCM-Korrekturinformationen zu nutzen;
- (f) die GBAS-Bordeinheit mit einem graphischen Display ausgestattet wird, das geeignet ist, den aktuellen Performanz- und Integritätsstatus darzustellen (Akzeptanz);

Das aus diesen Überlegungen abgeleitende detaillierte Architekturkonzept ist in Abb. 4-83 dargestellt.





**Abb. 4-83** Detaillierte Architektur der GBAS-Bordeinheit

Die blau gekennzeichneten Komponenten und Datenflüsse sind nur für Experimentier-, Demonstrations-, oder Verifikationskonfigurationen (Modus E) notwendig.

Im Standardmodus (Modus S) besteht die GBAS-Bordeinheit aus folgenden Komponenten:

**Tab. 4-20 Komponenten des GBAS-Nutzersegmentes (Standardmodus)**

<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Funktion</b>
1	GNSS-Antenne	Empfang der GNSS-Signale (GPS, Galileo) im L-Band
2	Telemetrieantenne	Empfang der Telemetriesignale (GBAS-Korrektursignal) im P-Band (433 MHz)
3	Rx2a GNSS-Empfänger	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Empfang der GNSS-Signale</li> <li>- Bereitstellung der Binärdaten mit den empfangenen GNSS-Messungen</li> <li>- Bestimmung der Position unter Nutzung der durch den RTK-Prozessor des Notebooks berechneten RTCM-Daten</li> <li>- Bereitstellung des Empfängerstatus</li> </ul>
4	Rx Modem	Bereitstellung der über die Telemetrestrecke empfangenen RTCM-Daten
5	UMTS-Router	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Herstellung der Verbindung zum Internet über UMTS</li> <li>- Server des lokalen Netzes des GBAS-Nutzersegments zur Vermittlung der Kommunikation und zum Datenaustausch zwischen allen Komponenten des GBAS Nutzersegmentes</li> </ul>

<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Funktion</b>
6	Notebook mobiler Prozessierungsrechner	Hardwareplattform <ul style="list-style-type: none"> <li>- zum Betrieb und zur Kontrolle aller Softwarekomponenten des GBAS Nutzersegmentes, insbesondere               <ul style="list-style-type: none"> <li>o des phasenbasierten DGNSS-Prozessors</li> <li>o der grafischen Nutzerschnittstellen</li> <li>o zur Steuerung und Kontrolle des GBAS-Nutzersegmentes.</li> </ul> </li> <li>- Anzeige von Positions-, Status- und Qualitätsinformationen</li> </ul>

Erste Tests mit einer Breadboardvariante des GBAS-Nutzersegmentes machten deutlich, dass bei hohen Datenraten abhängig vom eingesetzten Empfängertyp Überlastungen der Signalprozessoren im GNSS-Empfänger auftreten, die zu Datenverlusten führen können. Das war insbesondere dann der Fall, wenn die GNSS-Empfänger so konfiguriert wurden, dass bei hohen Updateraten (ab ca. 20 Hz) gleichzeitig sowohl RTK-Positionslösungen (kommerzieller Standardlösung) bestimmt als auch Roh- und NMEA-Daten ausgegeben werden sollten. Anforderungen, die zu solchen Effekten führen, werden jedoch nur im Experimentier-, Demonstrations-, oder Verifikationsmodus gestellt. Um zu ermöglichen, dass das GBAS-Nutzersegment auch im Rahmen anderer Vorhaben genutzt und bei Bedarf auch weiter entwickelt werden kann, wurde die Architektur so gestaltet, dass die erforderliche Datensicherheit durch das Hinzufügen der in folgenden Tabelle genannten Komponenten gewährleistet werden kann.

**Tab. 4-21 In erweiterten Betriebsarten der GBAS-Nutzersegmentes notwendige Komponenten**

<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Funktion</b>
1	Rx2b GNSS-Empfänger	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Empfang der GNSS-Signale</li> <li>- Bereitstellung der Rohdaten der empfangenen GNSS-Messungen (Entlastung von Rx2a von dieser Aufgabe)</li> </ul>
2	Antennenverteiler	Verteilung des von der GNSS-Antenne empfangenen HF-Signals an die Empfänger Rx2a und Rx2b

Im Sinne der Anforderungen (a) und (d) wurde im Architekturkonzept festgelegt, alle Softwarekomponenten des GBAS-Nutzersegments auf einem einzigen Rechnersystem arbeiten zu lassen. Die Aufgaben dieser SW-Komponenten sind in der folgenden Tabelle erläutert.

**Tab. 4-22 SW-Komponenten des GBAS-Nutzersegmentes**

<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Quelle</b>	<b>Modus</b>	<b>Funktion</b>
1	Phasenbasierter DGNSS-Prozessor	DLR	S	Berechnung der Nutzerposition aus den empfangenen GNSS- und GBAS-Daten Bestimmung nutzerbezogener Qualitätsparameter In den erweiterten Modi: Aufzeichnung der berechneten NMEA-Daten

<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Quelle</b>	<b>Modus</b>	<b>Funktion</b>
2	Ntrip NMEA Miniserver	DLR	S	Bereitstellung der NMEA-Daten des phasenbasierten DGNSS-Prozessors <ul style="list-style-type: none"> <li>- für die Visualisierung im Performanz GUI</li> <li>- im Mini-LAN der GBAS-Bordevinheit für das Performanz GUI</li> <li>- an die GBAS-Basisstation über den UMTS-Router im erweiterten Modus (E)</li> </ul>
3	Performanz GUI	DLR	S	Darstellung des Wertes und des zeitlichen Verlaufs von/der <ul style="list-style-type: none"> <li>- durch den phasenbasierten DGNSS-Prozessors berechneten Position und Genauigkeit</li> <li>- Qualitätskenngrößen (GBAS-Basis und GBAS-Bordevinheit)</li> </ul>
4	Miniserver (NMEA-Daten)	DLR	S	Bereitstellung der NMEA-Daten von <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rx2a (S) oder Rx2b (E) für die Archivierung</li> <li>- von Rx2a (S) oder Rx2b (E) für die Visualisierung im Performanz GUI</li> </ul>
5	Miniserver (Rohdaten)	DLR	E	Bereitstellung der Rohdaten von Rx2a zur Aufzeichnung Zusätzliche Bereitstellung der Rohdaten von Rx2b zur Aufzeichnung
6	Empfängerstatus	Javad/ TOPCON	E	Darstellung des Empfängerstatus (getrackte Satelliten, Empfangene Datentypen), RTK-Status des empfangereigenen RTK-Prozessors über PCCDU

Aus Abb. 4-83 ist weiterhin ersichtlich, dass im Standardmodus neben zwei HF-Kabeln für die Antennensignale nur drei Kabel benötigt werden, um die HW-Komponenten des GBAS-Nutzersegments untereinander zu verbinden. Im experimentellen Modus (E) werden zwei zusätzliche Kabel vom Antennenverteiler zu den Empfängern benötigt. Das Ethernetkabel zur Übertragung der Empfängerrohdaten wird von Empfänger Rx2a auf den Empfänger Rx2b gesteckt. Soll der Status des zweiten Empfängers ebenfalls überwacht werden, so muss dazu eine zweite Instanz von PCCDU<sup>6</sup> gestartet werden. Die RS232-Ausgänge der Empfänger werden dann über einen zusätzlich erforderlichen RS232/USB-Verteiler an den USB-Eingang des Notebooks (mobiler Prozessierungsrechner) angeschlossen.

Da die ALEGRO GBAS-Bordevinheit eine UMTS/Internet Verbindung zur Übertragung von Ergänzungssignalen nutzt, die im Gegensatz zur Standard-Telemetrielösung (Funkmodem) in beide Übertragungsrichtungen arbeitet, sind Datenübertragungen vom GBAS-Nutzersegment zum GBAS-Bodensegment möglich. Dieser Übertragungsweg wird im Standardbetrieb nicht genutzt, kann aber zur Übermittlung der Nutzerposition an die Basisstation oder an andere Orte zu Fernbedienungs- oder Demonstrationszwecken zum Einsatz kommen.

<sup>6</sup> bei PCCDU handelt es sich um eine vom Empfängerhersteller gelieferte SW zur Konfiguration und zum Monitoring des Empfängers

Die GNSS-Daten werden in einem herstellerspezifischen, kompakten Binärformat vom GNSS-Empfänger des GBAS-Nutzersegments zum Bordprozessor (Notebook) übertragen und mittels eigenentwickelter Softwarekomponenten in das EVnet spezifische Pseudo-RINEX3-Format dekodiert. Diese Eingangsdaten lassen sich im Experimentellen Modus auf dem GBAS-Nutzersegment sowohl im herstellerabhängigen, binären als auch in standardisierten RINEX Formaten für spätere Verwendung speichern. Im RTCM-Standard (3.0) ist bereits ein Schema für Galileo-Erweiterungen vorgesehen. Diese Erweiterungen sind bereits in der EVnet-SW implementiert. Zur Übertragung der RTCM-Daten über UMTS wird ein NTRIP-kompatibles Übertragungsprotokoll verwendet. Die Kommunikation mit diesem Protokoll ist mit einigen frei verfügbaren SW-Tools in gleicher Weise möglich wie mit den in ALEGRO entwickelten Softwarekomponenten. So ist es möglich, einen Vergleichsempfänger über eine serielle Schnittstelle mit den Korrekturdaten gesteuert durch eine Standardsoftware (wget) genauso zu versorgen, wie den phasenbasierten DGNSS-Prozessor.

Damit ist das GBAS-Nutzersegment auf Empfänger der Hersteller TOPCON und Javad abgestimmt. Ein Wechsel zu einem GNSS-Empfänger eines anderen Herstellers würde eine Erweiterung der Software des GBAS-Nutzersegments um einen spezifischen Rohdatendekoder notwendig machen. Auf Grund des modularen Aufbaus der Software erfordert diese Erweiterung nur einen begrenzten, überschaubaren Aufwand. Jedoch sollte hier daran erinnert werden, dass vor einer Nutzung eine umfassende Empfängervalidierung durchzuführen ist.

Da das durch das GBAS Bodensegment generierte Korrektursignal dem RTCM-Standard (3.0) folgt, ist es jedem Empfänger, der in der Lage ist eine phasenbasierte DGNSS-Lösung durch Nutzung von RTCM 3.0 zu bestimmen, möglich, das durch die Bodensegment erzeugte RTCM-Signal (3.0) dafür zu nutzen.

Die Schnittstelle zwischen dem RTK-Prozessor und dem Grafischen Nutzerinterface (GUI) überträgt das standardisierte NMEA Datenformat. Es ist ein lesbares ASCII Format, das in maritimen Systemen standardmäßig Verwendung findet und aus dem im GUI die Positions- und Genauigkeitsinformationen extrahiert und visualisiert werden.

Auf dem Bordcomputer werden die für das GBAS-Nutzersegment entwickelten Softwarekomponenten in einer Standard Linux Softwareumgebung betrieben. Die Hardwarearchitektur bietet unter Verwendung von nur drei Komponenten, von denen zwei leicht beschaffbare Standardkomponenten sind, ein großes Spektrum an möglichen Konfigurations- und Nutzungsszenarien.

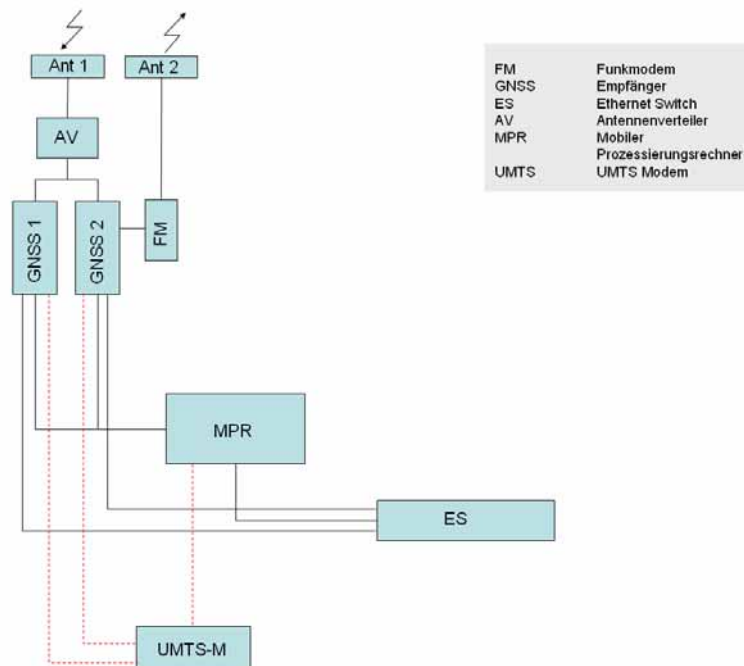
In der aktuellen Architektur des GBAS Nutzersegments, werden die Korrekturdaten über serielle Schnittstellen an den/die GNSS-Empfänger übertragen. Mit wenig Aufwand ist es möglich, den bereits vorhandenen Ethernet-Kanal ebenfalls dafür zu nutzen. Da sich dadurch die Anzahl der Kabelverbindungen reduziert, ließe sich dadurch auch die Robustheit des GBAS-Nutzersegmentes erhöhen.

In der aktuellen Lösung des GBAS-Demonstrators werden die im Vergleich zur verfügbaren UMTS-Bandbreite zwar niederratigen Ergänzungssignale von der Referenzstation sowohl zum phasenbasierten DGNSS-Prozessor als auch zu den Vergleichs-Empfängern, also mehrfach, übertragen. Um die Daten nicht mehrfach übertragen zu müssen, könnte ein vervielfältigender Vermittler (Proxy) für den Bordcomputer erstellt werden, der die Ergänzungssignale nur einmal empfängt und an den DGNSS-Prozessor und die angeschlossenen Vergleichsempfänger weiterleitet.

#### **4.5.2 HW-Aufbau GBAS-Nutzersegment**

Der HW Aufbau des Nutzersegments erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 4.3.2 getroffenen Komponentenauswahl. Die Verschaltung der HW Komponenten erfolgte entsprechend des in Abb. 4-83 dargestellten Blockschaltbildes des GBAS Nutzersegments. Der mobile

Prozessierungsrechner bildet die HW-Grundlage für die im Nutzersegment entwickelten SW Produkte. In Abb. 4-84 ist die Breadboard-Variante dargestellt, wie sie im Experimentier-, Demonstrations-, oder Verifikationsmodus genutzt wird.



**Abb. 4-84 Prinzipielles Blockschaltbild zur HW Verschaltung des ALEGRO GBAS Nutzersegments**



**Abb. 4-85 HW des GBAS Nutzersegments**

Die GBAS-Borereinheit lässt sich, in einem geeigneten Rucksacks untergebracht, von einer Person auch getragen betreiben. Dadurch sind ebenfalls Messungen an für Fahrzeuge unzugänglichen Orten möglich. Für großräumige Messungen im Hafengelände oder an Bord eines Schiffes lässt sie sich in einem Messfahrzeug oder an Bord des Schiffes unterbringen. Für den Bordcomputer wurde ein spezielles, spritzwassergeschütztes Modell gewählt, um den Einsatz in Messszenarien zu ermöglichen, in denen die GBAS-Borereinheit Umwelteinflüssen direkt ausgesetzt ist (Rucksackbetrieb, Einsatz auf kleinen Schiffen oder Schlauchboten).

Die im GBAS Nutzersegment verwendeten Empfänger vom Typ Javad TRIUMPH G3T sowie TOPCON Legacy EGGD+ übernehmen getrennte Aufgaben, werden jedoch an der selben Antenne betrieben. Der TRIUMPH Empfänger wird als RTK fähiger Empfänger für die rein empfangerbasierte Positionsbestimmung genutzt. Das bedeutet, dass dieser Empfänger seine akquirierten Rohdaten sowie die von der GBAS Bodenstation per Funk oder Internet empfangenen Korrektursignale intern, d.h. mittels seiner eigenen Firmware nutzt, um daraus die Position des GBAS Nutzersegments bestimmen zu können. Dieser Empfänger dient damit als Referenz bzgl. erreichbarer Positionsgenauigkeiten (Stand der Technik). Der zweite Empfänger dient rein dazu, an den Prozessierungsrechner des ALEGRO Nutzersegments Rohdaten, d.h. linkbezogene Messgrößen wie die Range- und Trägerphasenmessungen, das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und die Signalamplituden zu liefern. Erst im Prozessierungsrechner werden diese Daten mit den Korrekturdaten der GBAS Bodenstation gekoppelt und durch eigen entwickelte Prozessoren die Positionsbestimmung und Integritätsbewertung vorgenommen.

Die Antennen, der UMTS-Router und der GNSS-Empfänger sind Standardkomponenten, die direkt und ohne zusätzliche Software eingesetzt werden können. Bei Bedarf ist es jedoch möglich, diese Komponenten durch Geräte anderer Hersteller mit vergleichbaren Leistungsmerkmalen auszutauschen. Zu Entwicklungs-, Verifikations-, und Demonstrationszwecken ist es zudem möglich, das GBAS-Nutzersegment mit weiteren GNSS-Empfängern auszustatten. Erwähnt werden muss weiterhin, dass der TRIUMPH Empfänger bereits über die Fähigkeit verfügt, GALILEO-Signale zu empfangen und zu verarbeiten. Die derzeit von den beiden GALILEO-Testsatelliten abgestrahlten Signale können vom TRIUMPH Empfänger verarbeitet werden, spielen für das ALEGRO Nutzersegment aber noch keine Rolle.

### 4.5.3 SW-Aufbau GBAS-Nutzersegment

Wesentliche Aufgabe des ALEGRO GBAS-Nutzersegments ist der Leistungsnachweis GBAS-gestützter Positionierung unter Verwendung von differentiellen, phasenbasierten Positionierungsverfahren, die als das Differentialverfahren mit den höchsten Erwartungen an die erreichbare Genauigkeit einzustufen ist (siehe Abb. 4-86).

Allgemein werden DGNSS-Verfahren in zwei Hauptgruppen unterteilt:

- das Code-DGNSS (ohne Ambiguity Resolution)
- das Phasen-DGNSS (mit Ambiguity Resolution).

Beide Verfahren sind in eine Vielfalt von Untergruppen unterteilbar, die sich aus spezifischen Lösungsansätzen ableiten.

Differentielle GNSS-Verfahren					
Codebasiertes DGNSS			Phasenbasiertes DGNSS (RTK)		
Korrektur im Positionsraum	Korrektur im Beobachtungsraum	Code-Glättung	Präzises DGPS	Korrektur im Zustandsraum	

Anstieg Genauigkeit / Komplexität des Verfahrens ➔

**Abb. 4-86 Differentielle GNSS-Verfahren**

Für eine differentielle, phasenbasierte Positionsbestimmung im Dezimeterbereich werden Trägerphasenmessungen als relative Entfernungsmessung mit genutzt. Allerdings beinhalten diese Beobachtungsgrößen eine unbekannte ganzzahlige Mehrdeutigkeit, deren korrekte

Bestimmung zu den zentralen Problemen bei der Verwendung von GNSS für eine hochpräzise Positionierung gehört. Das „Festsetzen der Mehrdeutigkeiten auf die korrekten ganzen Zahlen von Zyklen“ findet man in der Literatur unter dem Begriff „Ambiguity Resolution“.

Durch den differentiellen Lösungsansatz, der auf der gleichzeitigen Nutzung der Beobachtungsgrößen der Referenzstation und des Nutzerempfängers beruht, wird eine Doppel-Differenzierung der Beobachtungen möglich. Diese ermöglicht eine Trennung der gesuchten Mehrdeutigkeitsterme von anderen, ebenfalls vorhandenen, systematischen Fehlern. In diesem Kontext ist besonderes Augenmerk auf die räumliche Dekorrelation einzelner Fehleranteile zu legen.

Um die durch die IMO geforderten Genauigkeits- und Integritätsanforderungen für Hafenbereiche und weiterführend für spezifische Anwendungen wie Anlegemanöver zukünftig erfüllen zu können, wurde folglich der Lösungsansatz „Phasen-DGNSS mit Korrektur im Zustandsraum“ verfolgt. Die zugeordneten Entwicklungsarbeiten und Ergebnisse werden in Kap. 4.5.3.1 näher erläutert.

Im Kontext erster Integritätskonzepte, bei denen auch die Funktionsverteilung des Integritätsmonitoring zwischen Bodensegment und Nutzersegment als eine offene Fragestellung identifiziert wurde, wurde für deren Umsetzung entschieden, eine Eigengenerierung der Korrekturdaten unter Verwendung des RTCM 3.0 Formats vorzunehmen. Dies bietet das Potenzial, so genannte „spare“ Messages zu nutzen, um (noch) nicht standardisierte Ergänzungsinformationen dem Nutzer bereitzustellen. Diese Softwareentwicklung ist in Kap. 4.5.3.2 beschrieben.

Um jedoch ein Nutzersegment als Demonstrator für die Anwendung eines differentiellen, phasenbasierten GBAS aufbauen zu können, musste eine dafür geeignete SW-Struktur konzipiert und umgesetzt werden. Diese wird im Folgenden kurz beschrieben:

Die Entwicklung der Softwarekomponenten des GBAS Nutzersegments erfolgte auf der Grundlage der Struktur und Prinzipien eines eigen entwickelten GNSS-Prozessorframeworks für Echtzeitprozessoren.

Als GNSS-Prozessoren im engeren Sinne werden auch beim GBAS-Nutzersegment thematische SW-Komponenten verstanden, die aus den vom Empfänger kommenden GNSS-Rohdaten sequentiell Ausgabedaten in Form höherwertiger Datenprodukte oder auch bestimmter Positionen erzeugen. Durch die Nutzung des GNSS-Frameworks steht eine Schnittstelle zur Verfügung, mittels derer Anpassungen und Erweiterungen aus Folgeentwicklungen über das Projekt hinaus jederzeit möglich sind. Das GNSS-Framework steht dabei in engem Zusammenhang mit der EVNet Infrastruktur. Auf Grundlage des Frameworks entwickelte Prozessoren können jedoch auch ohne EVNet betrieben werden, was z.B. auch genutzt wird, um Prozessoren im off-line-Modus zu entwickeln und auf der Grundlage von aufgezeichneten Rohdaten zu validieren.

Aus Gründen der Portabilität und Kompaktheit wurde die SW des GBAS Nutzersegments nicht in die EVnet Betriebssoftware integriert, sondern mit einer selbstständigen Betriebs- und Steuerumgebung ausgestattet. Unabhängig davon ist jedoch jederzeit möglich, die Sensoren des GBAS-Nutzersegments in die EVnet-Betriebssoftware zu integrieren und damit z.B. über das GBAS Bodensegments zu steuern und zu monitoren.

Die Betriebs- und Steuersoftware des GBAS Nutzersegments umfasst neben Vorprozessierungs- und Kommunikationskomponenten vor allem die Komponente des phasenbasierten DGNSS-Positionslösers. Diese Komponente wird im folgenden Kapitel 4.5.3.1 ausführlich beschrieben. Die Vorprozessierungs- und Kommunikationskomponenten unterteilen sich in die Subkomponenten:

NTRIP- Datenakquisitionskomponente

- zum Bezug von GNSS- und Ergänzungsdaten von NTRIP Castern
- zur Dekodierung und Synchronisation empfängerspezifischer GNSS-Daten sowie von RTCM-Ergänzungsdaten (3.0)
- zur Bereitstellung dieser Daten an die Kommunikationskomponenten und den Positionslöser

#### Supportmodule des Frameworks

- zur Berechnung von Satellitenpositionen aus Orbitparametern
- zur Transformation von Koordinatendarstellungen,
- zur Durchführung numerischer Matrixoperationen
- zur exakten GNSS-Systemzeitberechnung
- zur Ausgabe von NMEA Datenströmen

Die im GBAS-System eingesetzten GNSS-Empfänger verfügen über eine Ethernet Schnittstelle zur Übertragung von Daten auf Basis des TCP/IP-Protokolls. Diese Schnittstelle wird genutzt, um mittels eines speziell entwickelten Programms die Rohdaten eines GNSS-Empfängers zu dekodieren und diese der auf phasenbasierten DGNSS beruhenden Positionsprozessierungskomponente über dessen Broadcastermodul zur Verfügung zu stellen. Eine leicht veränderte Variante dieses Programms kommt zum Einsatz, um die Positionsergebnisse im NMEA-Format von einem GNSS-Empfänger im NTRIP-Protokoll an die Nutzerschnittstelle des GUI weiterzugeben.

Da der Betrieb des ALEGRO Nutzersegments im Experimentiermodus das Vorhandensein einer Internetverbindung voraussetzt, waren für den SW-Aufbau des GBAS Nutzersegments auch Mechanismen zu integrieren, die z.B. die Datenübertragung der Korrekturdaten in ein gesichertes LAN ermöglichen. Dafür sind im ALEGRO Nutzersegment spezielle Vorkehrungen getroffen worden, um auf Basis des Secure Shell (ssh) – Protokolls die notwendigen TCP/IP Verbindungen über Tunnel in der ssh Verbindung aufzubauen. So wird es möglich, den Korrekturdatenstrom über eine gesicherte Verbindung aus einem gesicherten Netz zu leiten. Diese Mechanismen werden ebenfalls dazu genutzt, die Ausgabedaten an entfernten Orten mit Internetanbindung visualisieren zu können.

#### **4.5.3.1 Differentieller, phasenbasierter Positionslöser**

##### **AUFGABE:**

Seine Grundaufgabe ist die Bestimmung der Nutzerposition basierend auf Eigenmessungen und den Messwerten der Referenzstation unter Verwendung des Lösungsansatzes „Phasen-DGNSS mit Korrektur im Zustandsraum“. Limitierend in diesem Kontext ist die Verfügbarkeit nur einer Referenzstation. Darin enthaltene Teilaufgaben sind:

- die Bestimmung der Koordinaten der Antennenposition des Nutzers und ihre Bereitstellung in Form einer NMEA GGA -Nachricht
- die Bestimmung der Parameter für eine Fehlerellipse und ihre Bereitstellung in Form einer NMEA GST-Nachricht
- die Ausgabe der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten (PRN-Nummer) und die Bestimmung der DOP Werte im lokalen Koordinatensystem sowie ihre Bereitstellung in Form einer NMEA GSA-Nachricht.

Mit dem dabei genutzten DIA-Verfahren (Detection, Identification, Adaption) wurde eine erste Form des Integritätsmonitorings implementiert werden.

##### **EINGANDSDATEN**



Der Prozessor arbeitet in der nutzerseitigen EVnet-Umgebung und nutzt die dabei vorhandenen Datenströme, die aus den Eigenmessungen generiert werden, und die Ergänzungsdaten der GBAS-Referenzstation, die aus dem RTCM-Datenmessages extrahiert wurden. In der Basisversion genutzte Daten sind die geglättete Entfernungsmessungen der GPS L1- und L2-Messungen sowie vorprozessierte Trägerphasenmessungen der Empfänger des GBAS-Bodensegments und des GBAS-Nutzersegments.

**AUSGANGSDATEN:**

Als Ergebnis der Prozessierung liegen die bereits beschriebenen NMEA-Messages vor.

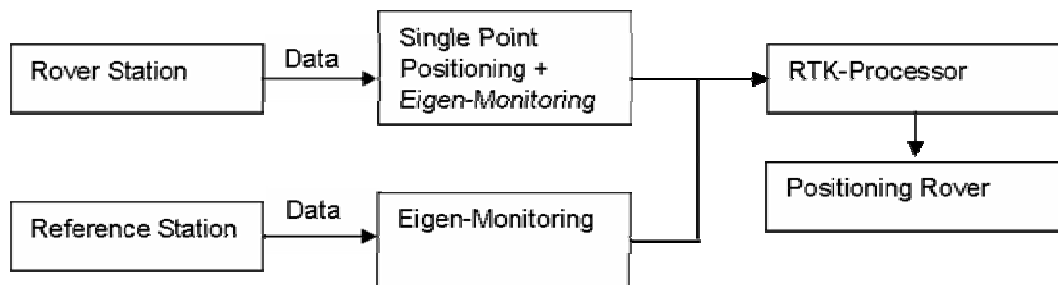
**KONFIGURATIONSPARAMETER:**

Folgende Parameter müssen vor dem Start des Prozessors in einer Konfigurationsdatei festgelegt werden:

- Stationsnamen, wobei die Referenzstation mit einem Suffix GBAS zu kennzeichnen ist
- WGS84-Koordinaten der GBAS-Referenzstation
- Elevationsmaske, falls gewünscht
- Normierte Verbesserung (Quantil für eine Normalverteilung) für den Detection Identification Adaptation Algorithmus

**FUNKTIONSWEISE:**

Ein Überblick über die allgemeine Funktionsweise des nutzerseitigen Positionierungsprozessors und seine Einordnung in den Prozessierungskette wird in Abb. 4-87 dargestellt.



**Abb. 4-87 Blockschaltbild nutzerseitige Positionsbestimmung**

Unter Single Point Positionierung (Einzelpunktbestimmung) wird die Ermittlung der absoluten Koordinaten eines einzelnen autonomen GPS-Empfängers verstanden, in die nur die Messinformationen dieses Empfängers einfließen. Sie wird deshalb auch Absolutpositionierung genannt. Diese ist unerlässlich, damit nutzerseitig im Fall von nicht verfügbaren Ergänzungsinformationen die Positionierung wenigstens im „stand alone“-Mode erfolgen kann. Je nach eingesetzten Empfänger und genutzten GNSS kann mit einer ein- bzw. zweifrequenzten Kombination von Code- und Phasenbeobachtungen gearbeitet werden. Die erreichte Genauigkeit einer Einzelpunktbestimmung ist niedriger als die Genauigkeit bei Nutzung von relativen GNSS-Messungen, weil dort zumindest anteilig systematische Fehler durch Differenzbildungen reduziert werden können.

Es gibt zwei Genauigkeitskategorien bei der Absolutpositionierung:

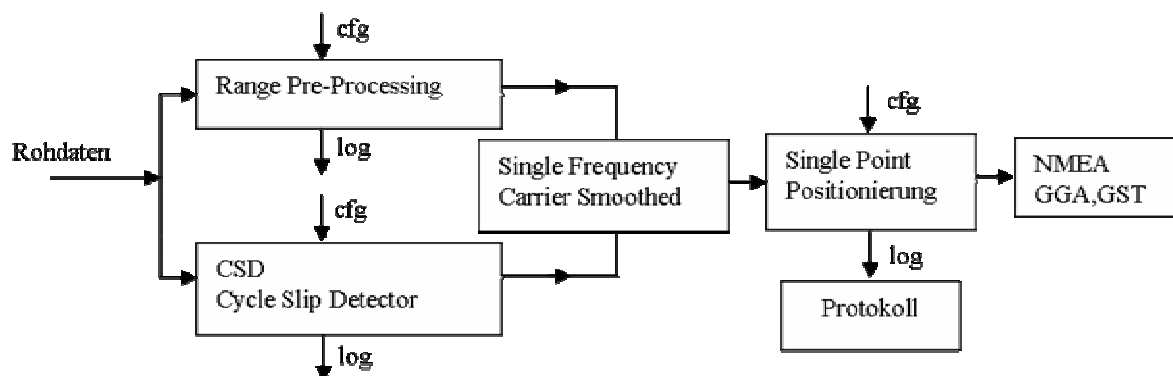
- die Einzelpunktbestimmung (Single Point Positioning SPP)

und

- die präzisen Punktpositionierung (Precise Point Positioning PPP).

Die SPP verwendet für die Bestimmung der Satellitenkoordinaten und Uhrkorrekturen die Broadcast-Ephemeriden, während bei der PPP die präzisen Ephemeriden eines Dienstes z.B. IGS genutzt werden. Für sicherheitskritische Anwendungen muss sich auf SPP beschränkt werden, weil PPP-Dienste derzeit keine Genauigkeits- und Nutzungsgarantien bieten.

In diesem Projekt wird ausschließlich mit Broadcast-Ephemeriden gearbeitet, da die Verfügbarkeit von präzisen Ephemeriden für Echtzeitanwendungen nicht garantiert werden kann. Zur Erhöhung der Genauigkeit des eingesetzten SPP werden Code geglättete Beobachtungen verwendet. Diese werden durch Vorprozessoren, wie in Kap. 4.4.5.1 und Kap. 4.4.5.2 beschrieben, bereitgestellt. Die sich dahinter verbergende Prozessierungskette ist in Abb. 4-88 dargestellt. Diese wird auch im Bodensegment im Kontext des GNSS-Monitoring verwendet, nur dass hier die unbekannten Koordinaten des Nutzers in die Ausgleichsrechnung einbezogen werden müssen.



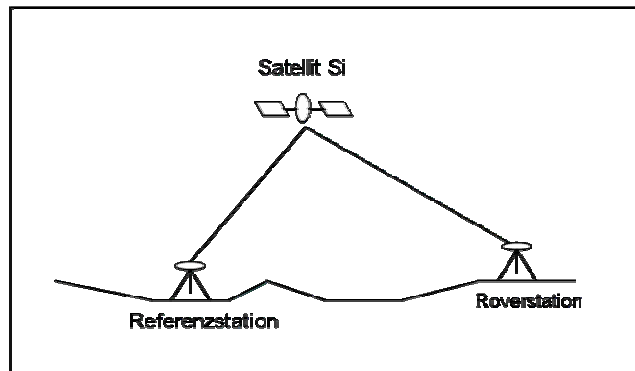
**Abb. 4-88 Prozessierungskette für eine SPS-basierte Positionsbestimmung**

Die eigentliche differentielle, phasenbasierte Positionsbestimmung erfolgt im so genannten RTK-Prozessor. Dafür sind 3 unterschiedliche Differenzbildungen anwendbar. Das mathematische Prinzip beruht auf der synchronen Verarbeitung von Beobachtungen gleichen Typs, die es erlauben, fast identische Fehleranteile durch Differenzbildung zu eliminieren oder deren Auswirkung zu reduzieren.

#### **EINFACHE DIFFERENZBILDUNG**

Mit den nulldifferenzierten Beobachtungen wird zuerst die einfache Differenzbildung durchgeführt. Sie wird zwischen Empfängern durchgeführt, welche den gleichen Satelliten zur gleichen Epoche empfangen. Dabei werden die Phasen- bzw. Codebeobachtungen der einen Station von den Phasen- bzw. Codebeobachtungen der anderen Station subtrahiert. Beide Empfänger müssen aber simultan denselben Satelliten messen ( Abb. 4-89).

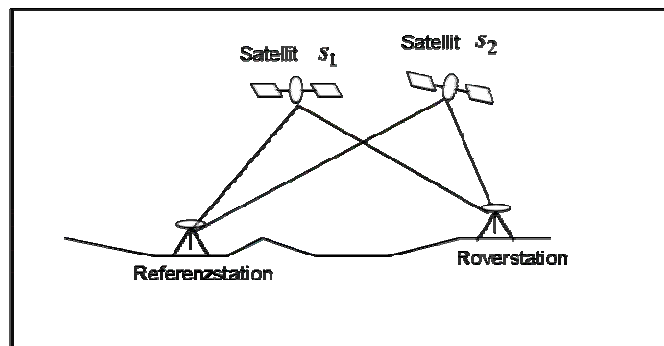
Die troposphärische und ionosphärische Refraktion werden durch die Differenzbildung reduziert, insbesondere wenn die Basislinien unter 30 km liegen. Die Satellitenbahnfehler werden vernachlässigt, da die Basislinien im Verhältnis zur Satelliten-Empfänger-Entfernung (20000 km) klein sind. Für Mehrwegeausbreitung ist jedoch eine Vergrößerung des Fehleranteils durch die Differenzbildung anzunehmen.



**Abb. 4-89 Einfache Differenzbildung**

### **DOPPELTE DIFFERENZBILDUNG**

Diese entsteht, wenn die einfache Differenz zweier Satelliten für dieselbe Referenzzeit voneinander subtrahiert wird (Abb. 4-90). Durch diese Differenzbildung werden z.B. die Empfängeruhrenfehler vollständig eliminiert. Voraussetzung ist eine exakt synchrone Messung, da andernfalls Restfehler höherer Ordnung berücksichtigt werden müssen. Die restlichen Fehleranteile werden durch die Doppeldifferenzbildung weiter reduziert.



**Abb. 4-90 Doppelte Differenzbildung**

Nachdem diese Doppel-Differenzen gebildet werden konnten, müssen die Mehrdeutigkeiten bestimmt werden. Als Basis der Mehrdeutigkeitsauflösung dient die von der TU Delft entwickelte LAMBDA Methode (Least-Square AMBiguity Decorrelation Adjustment). Diese wird in 3 Schritten durchgeführt:

#### **Float Lösung**

- Normal Matrix
- Cholesky Faktorisierung

#### **Integer Werte der Mehrdeutigkeiten**

- Dekorrelationsmatrix Z
- Suchraum Definition

#### **Fixed Lösung**

- Neue Schätzung der Unbekannte

Für eine ausführliche Beschreibung der Lambda-Methoden sei auf [Teunissen-1993], [Teunissen-1994], [Teunissen-1995] hingewiesen. Ein Gesamtüberblick über die Zusammenschaltung der unterschiedlichen Algorithmen ist in Abb. 4-91 gegeben.

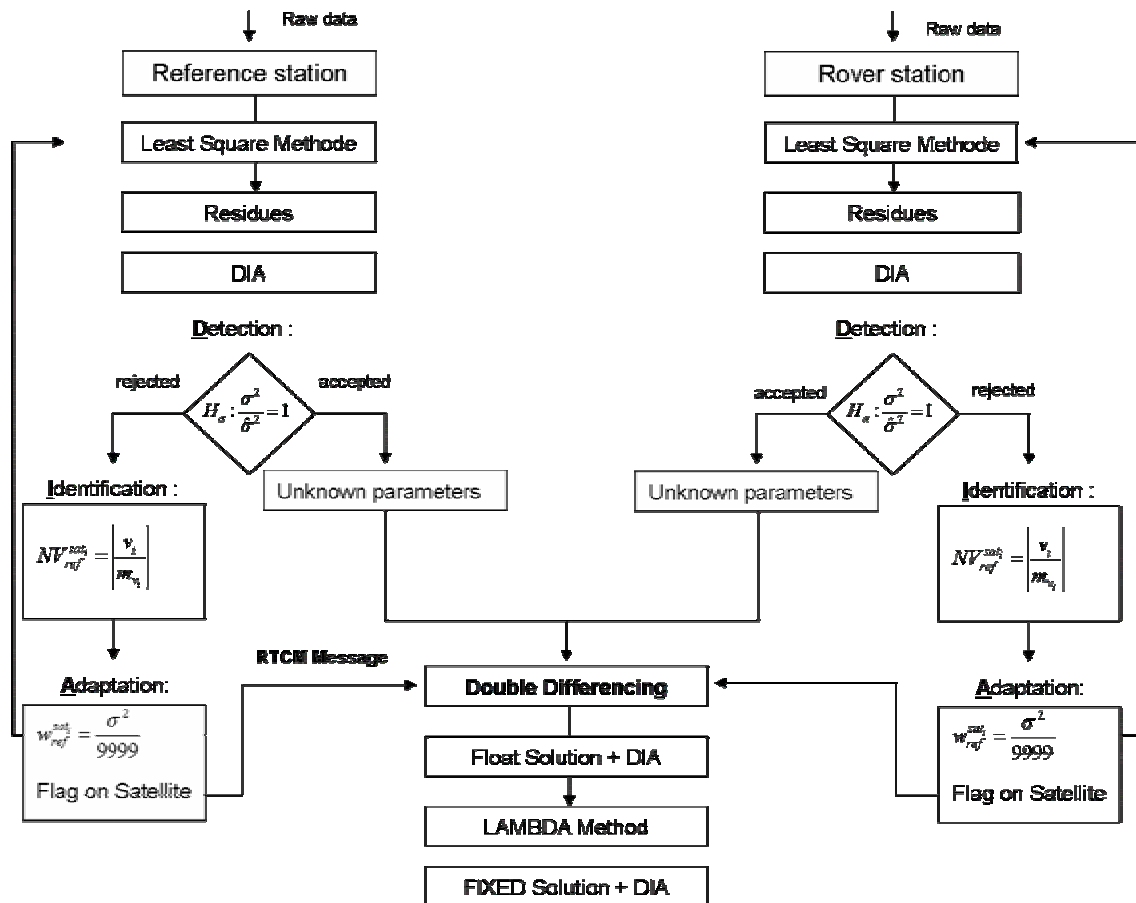
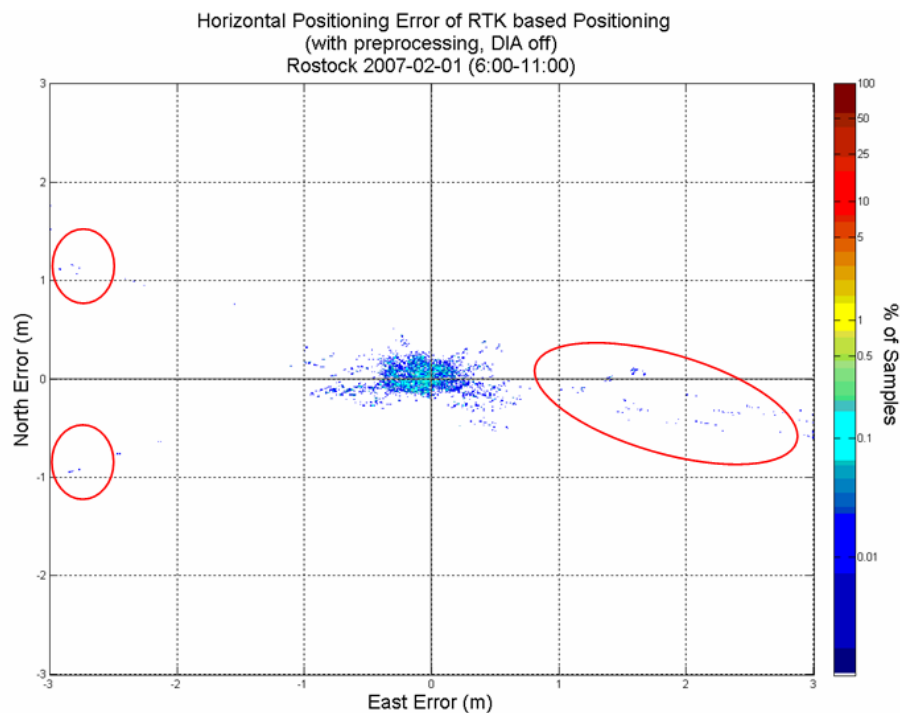


Abb. 4-91 Gesamtübersicht RTK Algorithmus

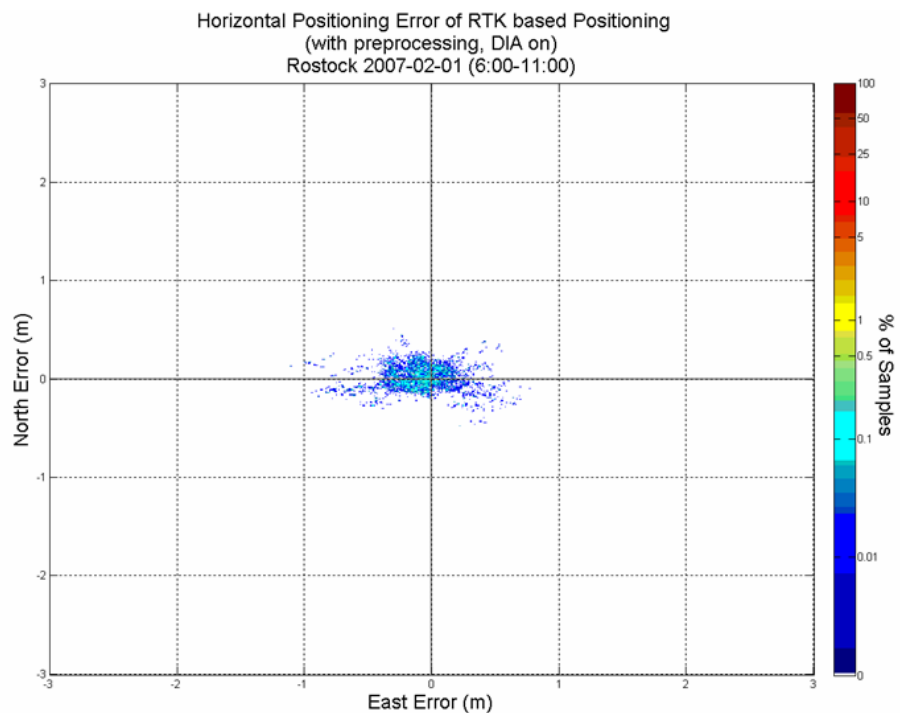
#### VALIDIERUNGSBEISPIEL:

Als Beispiel wurden die gemessenen Daten vom 2007-02-01 zwischen 6:00 und 11:00 prozessiert und dargestellt. Die Referenzstation war während der Fahrt nicht weiter als 15 km entfernt von der Referenzstation, so dass eine hohe räumliche Korrelation vorliegt. Als Roverstation wurde wie bereits erläutert, das Schiff „Prof. Albrecht Penck“ vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde genutzt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Differenzen zwischen der im Postprocessing ermittelten Referenztrajektorie und der mittels oben beschriebenem RTK-Processor berechneten Trajektorie. Eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse wurde dabei durch die Einschaltung des DIA-Algorithmus erzielt.

Es ist eindeutig erkennbar, dass Ausreißer, die Positionsfehler von einigen Metern zur Folge haben, erkannt wurden. Durch Ausschluss der verursachenden Satellitensignale können die Positionsfehler auf den Submeterbereich reduziert werden.



**Abb. 4-92 Positionsfehler (DIA ausgeschaltet)**



**Abb. 4-93 Positionsfehler (DIA eingeschaltet)**

Um den vorhandenen Algorithmus weiter zu verbessern, sind folgende weiterführende Arbeiten angedacht:

- Ein verbesserter Integritäts-Algorithmus (verbesserte Selektion nutzbarer Observablen)

- Ein verbessertes stochastisches Modell der Fehlermodelle (verbesserte Ambiguity Lösung sowie eine bessere Integritätsüberprüfung)
- Tests weiterer Mehrdeutigkeitslösungsalgorithmen auf ihre Effizienz (da falsche Fixierungen zu einem Verlust der Genauigkeit führen)

#### **4.5.3.2 RTCM 3.0 Dekoder**

##### **AUFGABE:**

Der RTCM-Dekode (3.0)r dekodiert einen binären, standardisierten RTCM-Datenstrom (3.0) und versorgt eine Softwarekomponente, die für die synchrone Versorgung von GNSS-Prozessoren mit Observations- und Ergänzungsdaten zuständig ist, mit den dekodierten Ergänzungsdaten über eine Softwareschnittstelle

RTCM 3.0 ist eine Weiterentwicklung des RTCM 2.x Datenformats. Es ist ein binäres nachrichtenbasiertes Protokoll, das mit einer speziellen Paketstartkennung, einer Längeninformation und einer Prüfsumme (CRC) ausgestattet ist und somit für Datenübertragungen auf nicht fehlerkorrigierte Übertragungskanälen, wie z.B. Funkstrecken, einsetzbar ist.

##### **EINGANGSDATEN:**

Die Eingangsdaten des Prozessores bestehen aus einer Folge von binären, standardisierten Nachrichten des RTCM 3.0 Formates. Jede Nachricht besteht aus einer äußeren immer gleichen Struktur, und eine inneren von Nachrichtentyp abhängigen Struktur. Die Nachrichten tragen eine 12-bit Nachrichtenkennung (4096 unterscheidbare Nachrichten) von denen im RTCM-Standarddokument (3.0) „10403.1 Amendment 1“ im Moment 20 Nachrichten fest definiert sind. Ein zusammenhängender Bereich von 94 Nachrichtenkennungen ist für herstellerspezifische Nachrichten reserviert, von denen 8 Nachrichtentypen bereits Herstellern von Hard- und Software im GNSS-Ausrüstungssektor zugewiesen wurden.

**Tab. 4-23 Aktuell dekodierte Nachrichtentypen des RTCM-Decoders (3.0)**

<b>Nachrichtentyp</b>	<b>Nachrichtenkennung</b>
extendetL1L2GPSRTKObservables	(1004)
stationaryRTKreferenceStationARPwithAntennaHeight	(1006)
antennaDescriptor	(1007)
antennaDescriptorAndSerialNumber	(1008)
extendetL1L2GLONASSRTKObservables	(1012)
systemParameters	(1013)
ephemerisDataGPS	(1019)
ephemerisDataGLONASS	(1020)

##### **AUSGANGSDATEN:**

An nachgeschaltete Softwarekomponenten werden die Informationen der Nachrichten aus Tab. 4-23 dekodiert. Weitergeleitet werden die Observablen C1,L1,P2,L2 oder P1,L1,P2;L2 mit den zugehörigen Zeitmarken..

##### **KONFIGURATIONSPARAMETER:**

keine

**FUNKTIONSWEISE:**

Der Decoder dekodiert und prüft alle Nachrichtentypen. Er akkumuliert dazu einen einlaufenden Byte-Datenstrom bis es entscheidbar ist, ob es sich um eine gültige RTCM-Nachricht handelt. Dann wird diese dekodiert, falls sie als gültig eingestuft wurde und falls eine Dekodierung für den Nachrichtentyp implementiert wurde. Bytes werden verworfen, wenn die akkumulierten Bytes keine gültige RTCM-Nachricht ergeben.

**VALIDIERUNG:**

Der RTCM-Dekoder (3.0) wurde mit von GNSS-Empfängern erzeugten RTCM-Ergänzungsinformationen (3.0) getestet, bei denen parallel GNSS-Rohdaten erzeugt wurden. Die dekodierten Ergänzungsinformationen und die dekodierten, herstellerspezifischen GNSS-Daten wurden miteinander verglichen. Es konnte Kompatibilität festgestellt werden.

**4.5.4 SW-Entwicklung GUI**

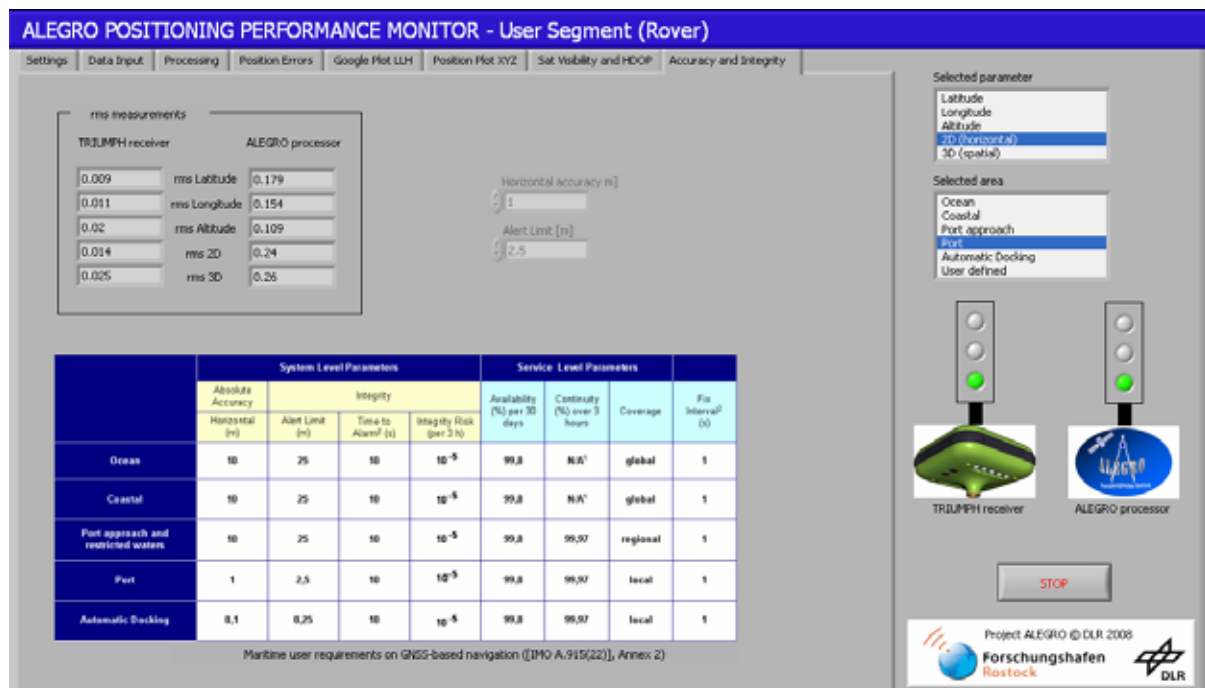
Für das Online-Monitoring der GBAS Nutzersegments war ein grafisches Nutzerinterface zu entwickeln. Ziel war es, den Nutzer mit einem Monitor zu versorgen, welcher folgende Informationen bereitstellen sollte:

- Anzeige der geografischen Koordinaten der ermittelten Position in Breite (Latitude), Länge (Longitude) und Höhe (Altitude) sowie in X, Y und Z als Punktwolke
- Anzeige der geografischen Koordinaten der ermittelten Position in Breite (Latitude), Länge (Longitude) und Höhe (Altitude) sowie in X, Y und Z als Trajektorie
- Anzeige des Positionsfehlers bei statischen Messungen (Validierungsszenario) durch Differenzbildung zu einer Referenzposition
- Ausgabe statistischer Kenngrößen (Standardabweichung des gemessenen Fehlers)
- Anzeige der erreichbaren Positionsgenauigkeit im Vergleich zu geforderten Genauigkeits- und Integritätskenngrößen der Schifffahrt
- Ausgabe weiterer Parameter wie DOP, Satellitenverfügbarkeit, Positionsverfügbarkeit, Positionslösungsalgorithmus

Zudem waren weitere Anforderungen zu erfüllen:

- das Interface sollte synchron die Datenströme eines Referenzempfängers sowie des ALEGRO internen Positionslösers in Echtzeit darstellen können
- aus Kompatibilitätsgründen sollten als Eingangsdatenströme normierte NMEA Datensätze in den Ausgabeformaten GGA und GST verwendet werden
- die Datenströme sollten über einen Broadcaster auf Basis von Socketverbindungen per TCP/IP Protokoll bereitgestellt werden, so dass das Monitoring des ALEGRO Nutzersegments auch ferngesteuert durch einen Operator über eine Internetverbindung erfolgen kann
- es sollte die Möglichkeit bestehen, die über Socketverbindungen eingehenden Datenströme abzuspeichern, um sie entweder im Postprocessing weiteren Analysen unterziehen zu können oder sie als Eingangsdatenströme im offline-Mode benutzen zu können
- der Monitor sollte es erlauben neben der online Darstellung auch eine offline Darstellung anzubieten (Auslesen von NMEA Files im GGA und GST Format)

Das folgende grafische Nutzerinterface (siehe Abb. 4-94) wurde auf Grundlage dieser Anforderungen in der Programmierungsumgebung Labview entwickelt.



**Abb. 4-94 Grafisches Nutzerinterface des ALEGRO GBAS Nutzersegments**

Über die Statusanzeige auf der rechten Seite des GUI wird dem Nutzer eine Anzeigemöglichkeit in Form einer Ampel angeboten, die darüber informiert, in welchem Genauigkeitsbereich sich die aktuell gemessene Position bewegt. Farblich angezeigt werden sowohl das Referenzsystem auf Basis des im Nutzersegments installierten TRIUMPH Empfängers (linke Ampel) als auch die Ergebnisse des in ALEGRO entwickelten Positionslösers (rechte Ampel).

Für diese Darstellung ist die durch den Nutzer zu treffende Auswahl in den beiden über der Ampel befindlichen Listenfeldern <Selected parameter> und <Selected Area> relevant. Erstere wählt die dafür genutzte Messgröße aus, auf die sich die Ampel beziehen soll (Latitude, Longitude, Altitude, 2D Position, 3D Position). Zweitere ist für die Auswahl der Nutzungsanforderungen bzgl. Genauigkeit und Integrität verantwortlich. Folgende Messumfelder können ausgewählt werden:

- Ocean → Fahren Hochseebereich (Ozean, Meer)
- Coastal → Fahren im küstennahen Bereich
- Port approach → Anfahren eines Hafens
- Port → Manövrieren im Hafen
- Automatic Docking → Automatisches Anlegen im Hafen

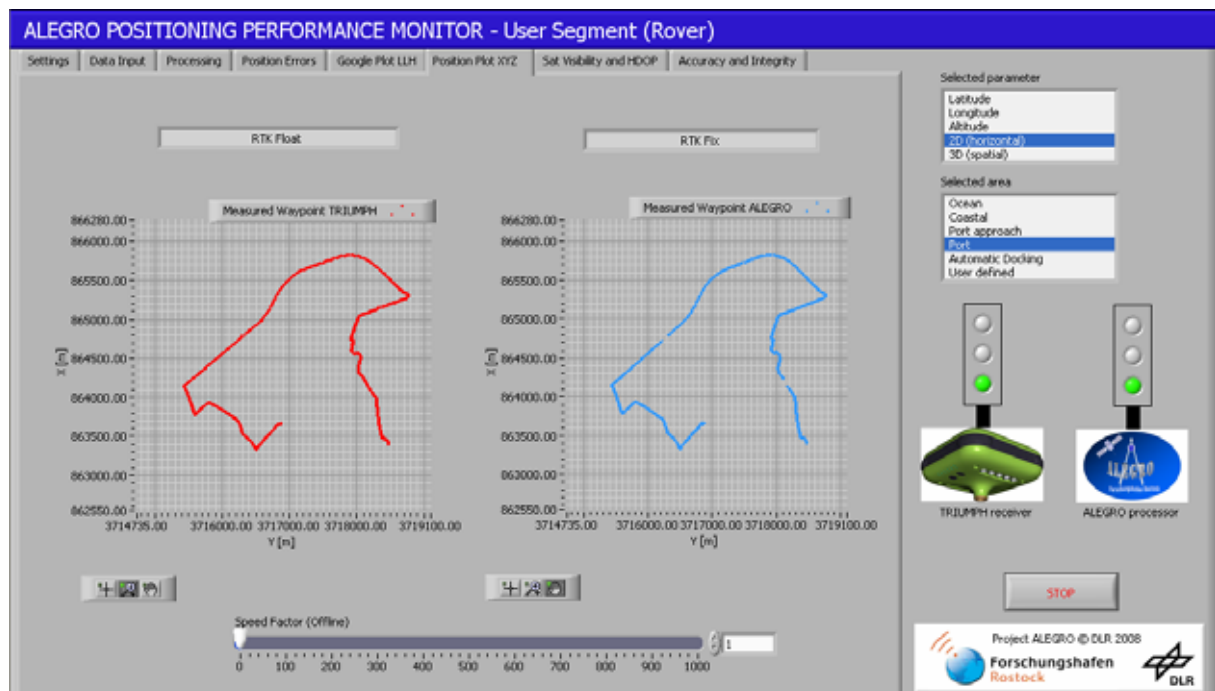
Entsprechend den maritimen Nutzeranforderungen an die GNSS-basierte Navigation (siehe Kap. 1) werden die entsprechenden Anforderungen an die absolute Genauigkeit sowie der Alarm Limit genutzt, um als Threshold Level für die Schaltung der Ampel auf gelb (der abgeschätzte Positionsfehler befindet sich zwischen der Anforderung an die absolute Genauigkeit und dem Alarm Limit) und auf rot (das Alarm Limit ist überschritten) zu setzen.



Durch die Ampel wird der Nutzer darüber informiert, ob in seinem Aufenthaltsbereich die Anforderungen an die GNSS-basierte Ortung erfüllt sind oder nicht.

Dem Operator obliegt es dann weiterhin, sich über die angebotene Auswahlliste spezifische Darstellungsarten für Positionsplots, Positionsfehler über der Zeit oder auf die auf eine Karte projizierten Positionsergebnisse angezeigt zu bekommen. Folgende Plotmöglichkeiten stehen dabei zur Auswahl:

- Position Plot → Scatterplotdarstellung der horizontalen Position (siehe Abb. 4-95)
- Position Errors Chart → Darstellung aller Positionsfehler über der Zeit (siehe Abb. 4-96)
- Google Plot → Darstellung der horizontalen Position bzw. Trajektorien auf einer Karte (siehe Abb. 4-97)
- Sat Visibility und HDOP → Satellitensichtbarkeit, HDOP und Positionsverfügbarkeit
- Accuracy and Integrity → Varianz von Lat, Lon, Alt, 2D und 3D Positionsfehlers



**Abb. 4-95 Scatterplotdarstellung des horizontalen Positionsfehlers**

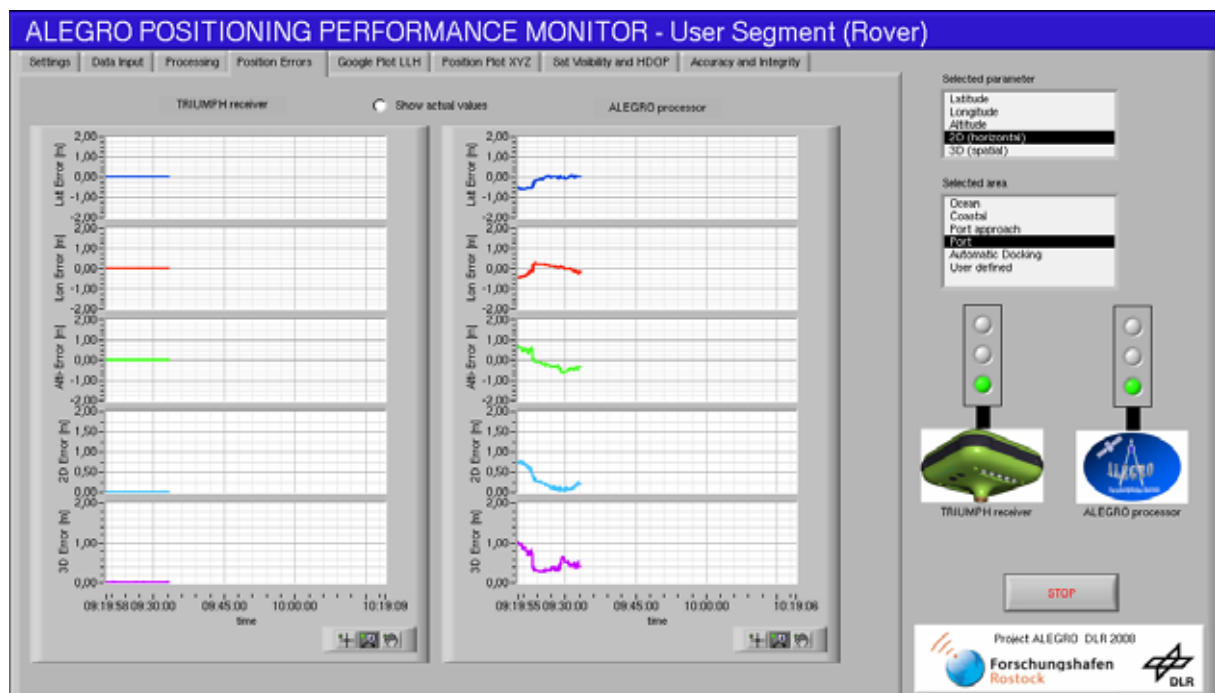


Abb. 4-96 ALEGRO GBAS Nutzersegment - Chartdarstellung aller Positionsfehler über der Zeit

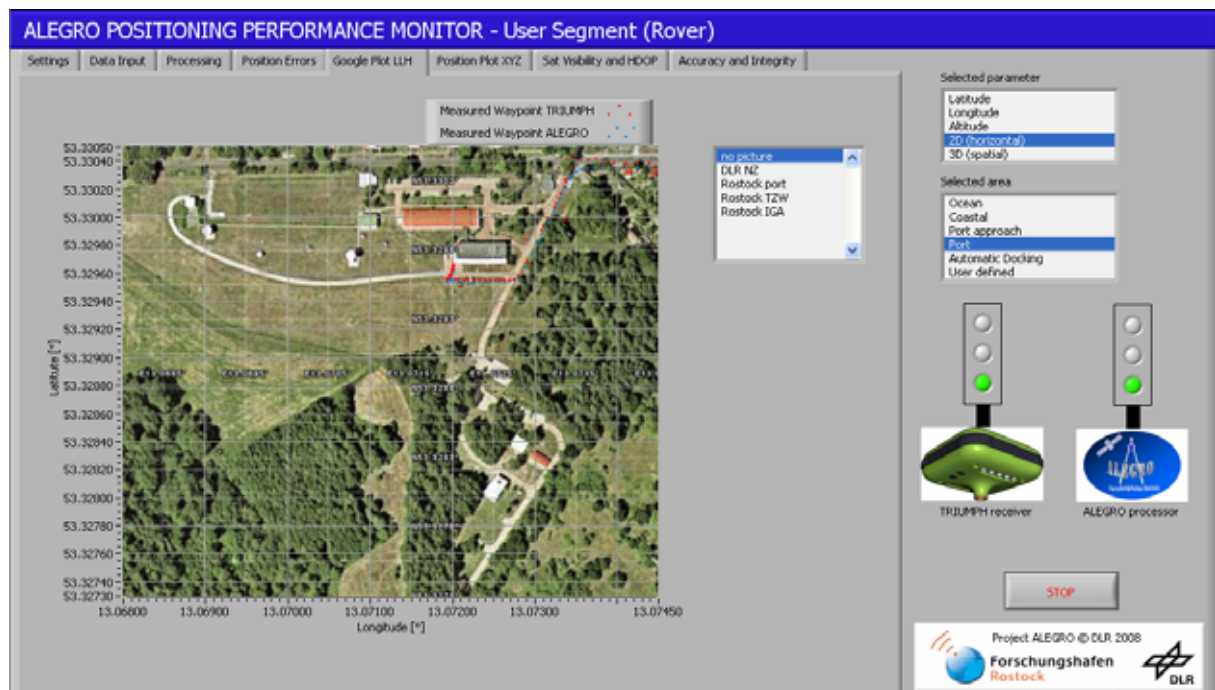


Abb. 4-97 ALEGRO GBAS Nutzersegment - Scatterplotdarstellung und Trajektorien des 2D Position auf einer Karte

## **5 Bewertung der erzielten Ergebnisse**

### **5.1 Fachliche Bewertung**

Als Projektergebnis entstand im Forschungshafen Rostock ein experimentelles GBAS für maritime Anwendungen. Dieses GBAS beruht auf einem phasenbasierten DGNSS-Lösungsansatz wodurch es möglich wird, die geforderten Genauigkeiten besser als 1 m im Hafenbereich erreichen zu können. Zudem ist das GBAS bereits mit ersten Integritätsmonitoringfunktionalitäten ausgestattet, die eine Eigenüberwachung des GNSS und des GBAS-Bodensegments ermöglichen. Als Entwicklungs- und Demonstrationsplattform wurde die EVnet-Technologie verwendet, deren modularer Aufbau im Sinne einer adaptierten Systemweiterentwicklung genutzt werden konnte und deren erweiterbare Datenschnittstellen bereits heute die Mitnutzung der zukünftigen GALILEO-Signale und die Generierung weiterer Datenprodukte vorbereitend unterstützen. Dafür notwendige Portierungsaufgaben der EVnet-Software sowie die Entwicklung weiterer Servicefunktionalitäten und Interfaces waren eine integrale Aufgabe beim Aufbau des GBAS-Experimentalsystems.

Ein wesentliches Entwicklungsergebnis im Rahmen von ALEGRO ist die GNSS Performance Assessment Facility (A-GPAF), die es erlaubt, wesentliche Qualitätskenngrößen für empfangene GNSS-Signale und für damit ermittelte Positionen in Echtzeit abzuleiten und auch bereitzustellen. Die Bestimmung der Qualitätskenngrößen erfolgt derzeit auf 3 Ebenen:

Ebene 1: Separate Validierung einzelner Rohdatentypen, Plausibilitätsprüfung der Navigationsdaten und Bewertung der Datenverfügbarkeit

Ebene 2: Fehlerbestimmung und wenn möglich Korrektur durch kombinierte Analyse preprozessierter Rohdaten zur Ableitung möglichst präziser Entfernungsmessungen

Ebene 3: Positionsbestimmung und Qualitätsbewertung unter Beachtung einsetzbarer Positionsbestimmungsverfahren.

Qualitäts- und Korrekturkenngrößen in diesem Sinne sind u.a.

- das Code- und das Phasenrauschen auf jedem Signal
- das Auftreten von Cycle Slips in den Phasenmessungen
- der Signal-Rausch-Abstand sowie seine Varianz
- die Größe von Mehrwegefehlern
- die Größe von Ionosphärenfehlern und ihre Gradienten
- der Minderung der Genauigkeit (Dilution of Precision, DOP) sowohl in Bezug auf verfügbare als auch nutzbare GNSS-Signale
- der verfahrensspezifische Positionsfehler am Referenzstandort.

Zugeordnete entwickelte und als Echtzeitprozessoren implementierte Algorithmen sind u.a.

- der Range-Preprozessor
- der SNR-Preprozessor
- der Code-Carrier Smoother Prozessor für Ein- und Zweifrequenzmessungen
- der STEC-Prozessor
- der DOP-Analysator

- ein- und zweifrequenzbasierte Positionslöser mit und ohne DIA<sup>7</sup>-Verfahren zur Integritätsprüfung.

Der in der A-GPAF erforderliche Phasen-Preprozessor sowie der Amplituden-Preprozessor konnten dabei als Entwicklungen aus einem bereits abgeschlossenen DLR-Vorhaben wieder verwendet werden. Die Verfahren zur Bestimmung von Qualitätskenngrößen in Echtzeit sind dabei als ein Novum anzusehen und in bisherigen Korrekturdiensten wie SAPOS oder ascos sowie in kommerziell nutzbarer RTK-Technik überhaupt nicht oder zumindest nicht in diesem Umfang implementiert.

Grundlage dafür ist eine hochratige Bereitstellung und Prozessierung von GNSS-Daten. Die Verfügbarkeit von Qualitätskenngrößen in Echtzeit ermöglicht im Gegensatz zu statistischen Messfehlermodellansätzen eine situationsbezogene Entscheidung über die für die Positionsbestimmung (sowohl stand-alone als auch phasenbasiertes DGNSS) nutzbaren Signale. Diese Verfahren liefern aber auch die Datengrundlage, um eine tageweise, automatisierte Generierung und Beschreibung des Nominalverhaltens am Referenzstandort vorzunehmen. Ein Novum in diesem Kontext ist auch, dass diese Monitoringsfunktionalitäten, die auch weiterführend zur Detektion von Ausreißern und zur Bestimmung von Störungsindices genutzt werden können, als selbst lernend ausgelegt sind. Diese Eigenschaft ist wichtig, um den Kalibrierungsaufwand zu senken, wenn an anderen Orten GBAS-Systeme aufgebaut werden sollen, wenn neue oder modernisierte Satellitennavigationssysteme wie GPS 3 und GALILEO in die Verarbeitung integriert werden oder wenn Änderungen an der Systemkonfiguration (z.B. Erhöhung der Abtastfrequenz mit leistungsfähigeren Empfängern) vorgenommen werden müssen.

Ein weiteres, wesentliches Entwicklungsergebnis des Projekts ALEGRO ist die Entwicklung von phasenbasierten DGNSS-Verfahren mit ersten Integritätsmonitoringsfunktionalitäten (DIA-Verfahren). Diese sowohl bodenseitig zur Integritätsüberwachung des GBAS als auch bordseitig für die Nutzerpositionsbestimmung eingesetzten Verfahren belegen bereits heute, dass auch für ein phasenbasiertes DGNSS eine zumindest dem IALA DGNSS vergleichbare Integritätsbewertung und -überwachung möglich ist. Obwohl bereits damit akzeptable Ergebnisse (Genauigkeiten im Bereich von 1 bis 2 dm, Ausreißeridentifikation und Ausschluss von der RTK-basierten Positionsbestimmung gestörter Signale) erreicht wurden, wird insbesondere in diesem Bereich ein weiterführender Entwicklungs- und Validierungsbedarf gesehen. Dieser begründet sich einerseits in den geforderten Leistungskenngrößen für automatisierte Anlegemanöver aber auch in der Notwendigkeit die Robustheit dieser Technologie aus Gesamtsystemsicht (z.B. Integrität genutzter Kommunikationskanäle, mehrfrequenzbasierte Verfahren) weiter zu erhöhen. Dies spiegelt sich in den identifizierten FuE-Inhalten des geplanten Projekts IngMAR bereits wieder und zielt auf die Weiterentwicklung des Stands der Technik.

## **5.2 Strategische Bewertung**

ALEGRO ist eines der Initialprojekte des Forschungshafens Rostock. Mit seiner erfolgreichen Bearbeitung und der Bereitstellung des GBAS-Experimentalsystems wurde ein wesentlicher Grundstein neben SEA GATE für den Aufbau des Forschungshafens Rostocks gelegt. Der Rostocker Hafen gewinnt durch diesen Technologien an Attraktivität. Es stehen zukunftssträchtige Hochtechnologien zur Verfügung, die es erlauben, Nutzern im Rostocker Hafen positionsbezogene Dienste und Services anzubieten. Solche Dienste können z.B. in der Unterstützung von Schiffsanlegemanövern, in der Ableitung prognostischer Verkehrslagebilder, in der Verfolgung und Steuerung von Gütern, in der Steuerung von Krananlagen aber auch in der Unterstützung klassischer Vermessungsaufgaben im

---

<sup>7</sup> DIA – Detection, Identification, Adaption

Hafenbereich liegen. ALEGRO bietet damit einen Mehrwert, der den Rostocker Hafen auch für ansiedlungswillige neue Firmen interessant machen sollte.

In diesem Kontext kommt auch dem Folgeprojekt ASMS, das im Unterauftrag des Schiffahrtsinstitutes Warnemünde (SIW) bereits durchgeführt wird, eine besondere Rolle zu. Ohne das Projekt ALEGRO wäre der ASMS-Projektantrag nicht möglich gewesen. Eine Aufgabe des DLR in ASMS ist die Bewertung von kommerziell verfügbarer und bordseitig einsetzbarer GNSS-Sensorik. Für die im Forschungshafen Rostock dafür durchgeführten Messfahrten war es sehr hilfreich, dass einerseits die an der ALEGRO-Referenzstation bewerteten Daten für vergleichende Analysen nutzbar waren und dass andererseits die mit RTK bestimmten Positionen (off- und online) als Referenzen verwendet werden können. Das Projekt ASMS finanziert aber auch den HW-technischen Aufbau und den softwaretechnischen Ausbau einer GBAS-Monitoringstation im Forschungshafen Rostock, dessen primäre Aufgabe die Überwachung der ALEGRO GBAS-Referenzstation in Echtzeit ist. Dies ermöglicht die Implementierung und Erprobung eines Integritätsmonitorings wie es von der IMO und IALA für maritime DGNSS-Dienste derzeit spezifiziert ist. Die bisher implementierte Eigenüberwachung (Local Integrity Monitoring) wird dadurch aufgewertet, weil damit auch die räumliche Dekorrelation von Ausbreitungsfehlern (Far Field Integrity Monitoring) in der Integritätsbestimmung mit berücksichtigt werden kann.

ALEGRO ist aber auch als Initialprojekt im Kontext satellitennavigationsbasierter jedoch auf maritime Dienste ausgerichteter FuE-Aktivitäten des DLR zu sehen. Die Bearbeitung dieses Projektes erforderte die Einarbeitung in maritime Nutzeranforderungen genauso wie das Studium bestehender Standards und Zulassungsverfahren. Bereits dies ist eine notwendige Grundlage, um über das Projekt hinaus den Dialog zwischen Entwicklern von Raumfahrttechnologien und Endanwendern im maritimen Sektor zu verstärken. Dieser beinhaltet genauso eine Kundenqualifizierung auf der Nutzerseite wie eine stärkere Beachtung von Anwendungsanforderungen auf der Entwicklerseite. Die Fortschritte in diesem Prozess sind z.B. erkennbar an der einrichtungs- und firmenübergreifenden Identifikation und Gestaltung von Folgeprojekten im Land Mecklenburg-Vorpommern (IngMAR) sowie der Kooperation mit nationalen Partnern (EADS RST, Germanischer Lloyd, T-Systems).

Die strategische Bewertung und Bedeutung der ALEGRO-Ergebnisse sind in Bezug

- auf Vermarktungsaussichten in Kap. 6.4
- auf den DLR Gewinn in Kap. 6.5
- auf die Bedeutung für die DLR-Beschäftigten in Kap. 7

vertieft ausgeführt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das DLR mit ALEGRO ein FuE-Themenfeld besetzt hat, welches strategisch sowohl für den Ausbau der Forschungs- und Entwicklungslandschaft in Mecklenburg-Vorpommern als auch für die Standortentwicklung Neustrelitz gleichermaßen von großer Bedeutung ist.

## **6 Auswertung, Nutzung und Verbreitung der Ergebnisse**

### **6.1 Publikationen**

Eine projektbegleitende Maßnahme innerhalb ALEGRO war die projektspezifische Darstellung von Aufgaben und Zielstellungen sowie die Vermittlung von Projektergebnissen. Da ALEGRO eines der Initialprojekte des Forschungshafens Rostock war, dienten diese als auch weitere Publikationen der Öffentlichkeitsarbeit dieses Netzwerkes. Dazu wurden vorwiegend Konferenzen, Workshops und auch Messen im nationalen und internationalen Rahmen genutzt. Die Liste aller Publikationen ist zusammenfassend im Kapitel 0 dargestellt.

Zugeordnet erstellte Foliensätze als auch Publikationstexte sind über die Elektronische Bibliothek des DLR unter dem Link

<http://elib.dlr.de/>

abrufbar bzw. einsehbar.

### **6.2 Datenbereitstellung**

Das ALEGRO System stellt für Nutzer im Rostocker Hafen zunächst Korrektursignale für phasenbasiertes DGNSS bereit.

#### **KORREKTURBEREITSTELLUNG PER FUNKKANAL**

Format:	RTCM 3.0
Protokoll:	proprietäres Format <sup>8</sup>
max. RTK Rate :	20 Hz (in Abhängigkeit der RTK Fähigkeit des Empfängers des Nutzers)
Frequenz:	433 MHz
Reichweite ab Referenzstation:	uneingeschränkt bis ca. 3 km, Empfang auf See bis 12 km möglich

#### **KORREKTURBEREITSTELLUNG PER INTERNET**

Format:	RTCM 3.0
Protokoll:	NTRIP
Host:	80.152.144.194
Port:	2101
Kennungsabfrage:	/GBAS
max. RTK Rate :	20 Hz (in Abhängigkeit der RTK Fähigkeit des Empfängers des Nutzers)
Reichweite ab Referenzstation:	uneingeschränkt → Internetzugang muss vorhanden sein

Des Weiteren werden die aufgezeichneten Rohdaten der Station in einem Archivierungssystem abgelegt und können damit für Analysen im Post-Prozessing sowie als Referenzdaten (z.B. zur Ermittlung von Referenztrajektorien) anderen Nutzern des Forschungshafens Rostock im Rahmen von Projekten und Messkampagnen zur Verfügung

---

<sup>8</sup> siehe <http://www.satelaustria.com/contray/html/produkte/satellite-modems/satellite-3as-d.html>

gestellt werden. Der Zugriff auf diese Daten obliegt dem DLR. Besteht folglich im Rahmen von Projekten, Messkampagnen oder Demonstrationen Bedarf an aufgezeichneten Rohdaten, Positionsergebnissen oder Referenztrajektorien, so wird darum gebeten, entsprechende Anfragen per email an eine folgende Personen (email-Adressen) zu richten:

[Evelin.Engler@dlr.de](mailto:Evelin.Engler@dlr.de)

[Thoralf.Noack@dlr.de](mailto:Thoralf.Noack@dlr.de)

Um eine zügige Bearbeitung zu ermöglichen, sind den Anfragen folgende Informationen beizufügen:

- Name des Anfragenden
- Institution des Anfragenden
- Grund für Datenbezug
- Zeitraum der benötigten Daten

Zu beachten ist, dass das Projekt ALEGRO selbst keinen operationellen Testbettbetrieb beinhaltet, der den Bezug von Rohdaten oder ähnlichem anbietet.

Unabhängig davon stellt das DLR für die Entwicklung von Client-Anwendungen auf Basis des im Bericht mehrfach erwähnten Netzwerkes EVNet auf Anfrage gern ein entsprechendes API zur Verfügung.

Erfahrenen C++ Programmierern ist es mit diesem API möglich, sich direkt an Echtzeitdatenströme anzubinden, die von GBAS Bodensegment bereitgestellt werden. Bei den Echtzeitdatenströmen kann es sich entweder um Rohdaten, prozessierte Daten oder Korrekturdaten handeln. Anfragen dieser Art sind ebenfalls über die beiden oben genannten Personen zu stellen.

### **6.3 Ergebnisdokumentation**

Im Rahmen des Projektes ALEGRO entstand eine Vielzahl von Technischen Berichten, um wesentliche Entwicklungsarbeiten im HW- und SW-Bereich sowie durchgeführte Validierungsmaßnahmen, durchgeführte Messkampagnen und zugeordnete Analyseergebnisse zu dokumentieren. Diese wurden durch das Projektmanagement initiiert, um einerseits den Projektfortschritt nachzuweisen und um andererseits den projektintern notwendigen Informationsfluss zwischen den Projektmitarbeitern in Bezug auf das Gesamtergebnis zu gewährleisten. Darüber hinaus dienen Technische Berichte allgemein auch zur nachhaltigen Absicherung bereits erzielter FuE-Ergebnisse.

Die Technischen Berichte wurden entsprechend ihrer Relevanz in Bezug

- auf die Verbreitung von wissenschaftlich-technischen Ergebnissen von durch die öffentliche Hand geförderten Projekten

und

- unter Beachtung von noch offenen Schutzrechtsansprüchen

wie folgt klassifiziert:

In Tab. 6-1 sind die Technischen Berichte aufgelistet, deren Inhalt als relevant für diejenigen Unternehmen und FuE-Einrichtungen eingestuft wird, die an der Entwicklung, Nutzung oder auch wirtschaftlichen Verwertung von GNSS/GBAS-basierten Entwicklungen interessiert sind. Um einen einfachen Zugriff auf die Dokumente zu ermöglichen, sind diese über die Elektronische Bibliothek des DLR unter dem Link

<http://elib.dlr.de/>

abrufbar bzw. einsehbar.

**Tab. 6-1 Öffentliche Technische Berichte (Public)**

ID	Titel	Autor
TN-P 1.	Messkampagne 30.01.-02.02.2007: Messaufbau und Messdurchführung	T. Noack
TN-P 2.	Messkampagne 30.01.-02.02.2007: TTC Positionsbestimmung	R Reimer
TN-P 3.	Messkampagne 30.01.-02.02.2007: „Positionsverfügbarkeit und - Qualität“	S. Schlüter
TN-P 4.	Messkampagne 30.01.-02.02.2007: „Plausibilitätsprüfung genutzter Quelldateien“ (NMEA und Georeferenzierung)	A. Hirle
TN-P 5.	Messkampagne 30.01.-02.02.2007: Rohdatenqualität und -Verfügbarkeit	E. Engler
TN-P 6.	A-GPAF ALEGRO GNSS Performance Assessment Facility	T.Noack
TN-P 7.	Aufbau und Betrieb der ALEGRO RTK Referenzstation	T.Noack
TN-P 8.	Messkampagne 27.05.2008: Genauigkeit und Verfügbarkeit von RTK	R Reimer

In Tab. 6-2 sind diejenigen Technische Berichte aufgelistet, die detailliert einzelne Algorithmen- und Softwareentwicklungen, Schnittstellen oder die Architektur wesentlicher GBAS-Subsysteme beschreiben. Obwohl auch hier ein öffentliches Interesse durch Unternehmen und FuE-Einrichtungen angenommen werden kann, die an der Entwicklung, Nutzung oder auch wirtschaftlichen Verwertung von maritimen GBAS-Entwicklungen interessiert sind, ist der Zugriff auf diese Technischen Berichte nur nach Rücksprache mit dem Projektmanagement möglich. Dies wird als erforderlich angesehen, um mögliche Schutzrechtsansprüche in diesem Kontext abzusichern. Diese Technischen Berichte sind ebenfalls in der Elektronischen Bibliothek des DLR gespeichert und folglich unter dem Link

<http://elib.dlr.de/>

gelistet. Jedoch bedarf der Zugriff auf diese Dokumentationen speziell zu vergebende Zugangsrechte.

**Tab. 6-2 Technische Berichte (Spezifische Ergebnisberichte)**

ID	Titel	Autor
TN-E 1.	RTK Algorithmen	J. Beckheinrich
TN-E 2.	Single and Dual Frequency Positionslöser	J. Beckheinrich
TN-E 3.	DGPS Processor	J. Beckheinrich
TN-E 4.	UERE Processor	J. Beckherinrich
TN-E 5.	ALEGRO Range-Preprozessor	A. Hirle
TN-E 6.	STEC Processor	E. Engler
TN-E 7.	DOP Modul	D. Klähn
TN-E 8.	Dual Frequency Carrier Smoothing	E. Engler
TN-E 9.	Single Frequency Carrier Smoothing	E. Engler
TN-E 10.	Single Frequency Carrier Phase Processor	D. Klähn
TN-E 11.	Amplitude Processor	D. Klähn

Technische Berichte, die primär für die Weiterentwicklung und den Ausbau des in ALEGRO entstandenen experimentellen GBAS-Systems von Bedeutung sind und folglich nur für den



DLR-internen Gebrauch bestimmt sind, sind in Tab. 6-3 aufgelistet. Sie beinhalten primär Vorgaben für Softwareentwickler oder Informationen über die Softwareversionsverwaltung des Echtzeitprozessierungssystems.

**Tab. 6-3 Interne Technische Berichte**

ID	Titel	Autor
TN-I 1.	Richtlinien zur Prozessorimplementierung und allgemeinen Implementierungsaspekten unter Berücksichtigung von MSVC.NET	D. Klähn
TN-I 2.	Konfiguration des Routers des DSL-Anschlusses	T. Noack
TN-I 3.	RTK Empfänger Kommandierung für Base (Referenzstation) und Rover	T. Noack
TN-I 4.	Umstellung von EVnet-Processoren von Javad-Raw-Input- auf RINEX2-Input-Daten	D. Klähn

Darüber hinaus ist es nach Freigabe des Projektauftraggebers vorgesehen, dass der Endbericht des Projekts ALEGRO über die Elektronische Bibliothek des DLR einsehbar ist.

## 6.4 Vermarktungsaussichten der Ergebnisse

Mit dem Projekt ALEGRO ist ein experimentelles GBAS-System im Forschungshafen Rostock entstanden, das derzeit folgende Anwendungsoptionen bietet:

- Mit dem Betrieb einer Referenzstation im Überseehafen Rostock ist es generell möglich, RTK-basierte Positionierungsverfahren als Basiselement für darauf aufbauende GBAS Entwicklungen oder als Referenzpunkt für alternative Navigationsverfahren im Forschungshafen Rostock zu nutzen.
  - Zugriffsmöglichkeiten auf die durch das GBAS generierten GNSS-Bewertungen und Ergänzungssignale in Echtzeit als auch auf archivierte Referenzdaten sind im Kapitel 6.2 beschrieben.
  - Das ALEGRO GBAS ist in der Lage, Ergänzungssignale entsprechend dem derzeit spezifizierten RTCM-Standard (3.0) oder in einem erweiterten, jedoch noch nicht standardisierten RTCM-Format (3.x) bereitzustellen. Dadurch ist abgesichert, dass kommerziell verfügbare, RTK-fähige Empfänger immer die ausgestrahlten Ergänzungssignale nutzen können, insofern ihre Schnittstelle für Korrekturdaten für RTCM 3.0 ausgelegt ist. Um jedoch die durch das ALEGRO GBAS bereitgestellten Zusatzinformationen in der GNSS/RTK-basierten Positionsbestimmung nutzen zu können ist es erforderlich, das in ALEGRO entstandene GBAS-Nutzerterminal zu verwenden. Dies ist derzeit für Nutzer und Partner des Forschungshafens Rostock in Absprache mit dem DLR und später über das „Netzwerk für maritime GALILEO-Anwendungen“ des Forschungshafens Rostock möglich.
  - Das ALEGRO GBAS System wird für mindestens 1 Jahr über das Projektende hinaus durch das DLR weiterbetrieben. Da es ein experimentelles GBAS ist, das auch in bereits laufenden Projekten wie ASMS sowie geplanten Projekten wie IngMAR weiterentwickelt wird, kann ein operationeller Zugriff auf das System nicht jederzeit garantiert werden. Um folglich Nutzer- und Entwickleranforderungen abzugleichen, sollte stets eine Absprache mit dem DLR zwecks Abstimmung der Nutzungsanforderungen erfolgen.
  - Für die Bearbeitung des Projekts ALEGRO war es erforderlich, Referenztrajektorien von dynamischen Nutzern durch gemeinsame

Postprozessierung der Referenz- und Nutzerdaten zu bestimmen. Durch die weitestgehend permanente Aufzeichnung von Referenzdaten an der GBAS-Station kann weiterführend die Bereitstellung von Referenztrajektorien und die Interpretation als eine Servicefunktionalität im Kontext des Forschungshafens Rostock betrachtet werden. Durch die dafür notwendige Bindung von Personalressourcen des DLR kann dies derzeit nur im Rahmen gemeinsamer Projekte oder kostenpflichtig umgesetzt werden.

- Das ALEGRO GBAS verfügt gegenüber herkömmlichen RTK-Systemen über eine GNSS Performance Assessment Facility (A-GPAF), die zur Überwachung und Performancecharakterisierung genutzter GNSS-Systeme wie GPS und auch zukünftiger Systeme wie GALILEO dient.
  - Der Zugriff auf diese abgeleiteten Leistungskenngrößen ist in Echtzeit jederzeit möglich (siehe Kapitel 6.2), bedarf aber spezieller Zugangsrechte, insofern diese Größen nicht Bestandteil des erweiterten, jedoch noch nicht standardisierten RTCM-Formates (3.x) sind. Dies ist derzeit für Nutzer und Partner des Forschungshafens Rostock in Absprache mit dem DLR und später über das „Netzwerk für maritime GALILEO-Anwendungen“ des Forschungshafens Rostock möglich.

Die Anwendung dieser Optionen wird bereits in dem national geförderten Projekt „Advanced Sailing Management System“ (ASMS) praktiziert, in dem das IKN als Unterauftragnehmer des Schiffahrtinstitutes Warnemünde u.a. für die experimentelle Validierung bordseitig eingesetzter GNSS-Sensorik verantwortlich ist.

Mit ASMS wird aber auch bereits heute die Kontinuität der GBAS-Systemweiterentwicklung bis in das Jahr 2009 abgesichert. Wie bereits im Kapitel 2 und 3 dargelegt, ist es für maritime Anwendungen essentiell, dass auch eine Integritätsüberwachung des GBAS-Dienstes erfolgt, um überhaupt die „Safety-of-Life“-Anforderungen an GNSS-basierte Ortung und Navigation erfüllen zu können. Mit der bisherigen ALEGRO-Architektur, die resultierend aus dem verfügbaren Investitionsbudget des Projektes auf ein Einstationssystem ausgerichtet sein musste, ist es jedoch nur möglich, eine Eigenbewertung des GBAS unter Verwendung der Referenzstationsmessungen und –korrekturen durchzuführen (reduziertes „Local Integrity Monitoring“). Das impliziert jedoch, dass

- eine Fehlerseparierung zwischen dem GNSS und genutzter GNSS-Messtechnik nur eingeschränkt möglich ist,
- dass Störungen auf dem Korrekturdatenkommunikationskanal höchsten nutzerseitig erkennbar sind

und

- dass Effekte, die aus der räumlichen Dekorrelation bereitgestellter Korrekturdaten resultieren, nicht quantitativ bewertet werden können.

Mit ASMS wurde es bereits in diesem Jahr möglich, den hardwaretechnischen Aufbau einer Integritätsmonitoringstation im Hafen Rostock auf dem Gebäude des Schiffahrtinstituts vorzunehmen, wobei 2009 die softwaretechnische Implementierung der dafür notwendigen Algorithmen in die ASMS-Station vorgesehen ist. Mit Abschluss beider Projekte wird Ende 2009 ein Experimentalsystem zur Verfügung stehen, das phasenbasierte DGNSS-Verfahren entsprechend den durch die IMO und IALA geforderten Verfahren zur Integritätsbestimmung von DGNSS-Diensten ([IALA-R-121], [IALA-R-135], [IMO MSC.114(73)]) auch experimentell validieren kann.

Ähnlich wie in der Luftfahrt ist die wirtschaftliche Verwertung der GBAS-Entwicklung an die Entwicklung neuer Standards und damit verbundener Zulassungen gebunden. In [IALA-R-

**135]** ist explizit ausgewiesen, dass weder Pseudolite- noch phasenbasiertes GBAS (hier RTK genannt) derzeit als maritime Navigationshilfe zugelassen sind. Gleichzeitig ist auch ausgeführt, dass jedoch nur diese Verfahren geeignet sind, den bestehenden Bedarf an präziser Ortung (Fehler kleiner 1 m) für den Hafenbereich zu ermöglichen.

Der mit ALEGRO erreichte Entwicklungsstand, der konform zum ursprünglich geplanten Projekthinhalt ist, zielte vorrangig auf den Nachweis der technischen Machbarkeit, dass mit Hilfe von phasenbasierten DGNSS-Verfahren auch Positionsgenauigkeiten im dm-Bereich im maritimen Anwendungssektor (Hafenbereiche) erreichbar sind und dass durch geeignete Integritätsmonitoringsverfahren (Boden- und Bordsystem) auch diese Verfahren zuverlässig genutzt werden können. Diese Zielstellung wurde erreicht. Dennoch sind Folgearbeiten notwendig, um bereits erzielte Ergebnisse weiterzuführen und eine wirtschaftliche Vermarktung mittel- und langfristig zu sichern. Für eine wirtschaftliche Verwertung ist nach wie vor der Korridor in Bezug auf Pseudolite- und RTK-basiertes GBAS gegeben, wobei letztlich die Erfolgschancen für eine Zulassung und damit eine wirtschaftliche Verwertung durch die bereits aufgebauten Experimentalsysteme und ihre Nutzbarkeit als Entwicklungs- und Validierungsplattform deutlich erhöht wurden.

In diesem Kontext sollte erwähnt werden, dass auf Initiative des niederländischen Lotsensverbands der Hafen Rotterdam mit einem RTK-basierten GBAS bestehend aus einem Netzwerk von mit Standardtechnik versehenen Referenzstationen ausgestattet wurde. Im Hafen Rotterdam durchgeführte Validierungen und Praxistests belegten, dass die von den Lotsen eingesetzte mobile GNSS/RTK-basierte Ortungstechnik horizontale Positionsgenauigkeiten im Bereich einiger cm ermöglicht. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass auch noch nicht standardisierte Verfahren zum Einsatz kommen können, wenn nur das Nutzerinteresse im jeweiligen Hafen groß genug ist, und dass die mit ALEGRO begonnene Entwicklungslinie bzgl. RTK-basiertes GBAS auch durch Anwender als ein erfolgsversprechender Lösungsansatz betrachtet wird.

## **6.5 Gewinn für das DLR**

Mit ALEGRO wurde erstmalig durch das DLR ein Projekt durchgeführt, das auf die Weiterentwicklung und Nutzung von GNSS/GALILEO-Schlüsseltechnologien für maritime Anwendungen ausgerichtet war. Als eines der Initialprojekte des Forschungshafens Rostock wurde damit die notwendige Grundlage für das DLR geschaffen, die bestehenden Expertisen im Bereich der Satellitennavigation in den sich entwickelnden Forschungsverbund in Mecklenburg-Vorpommern einzubringen sowie Expertisen über Nutzeranforderungen, bestehende Standards (u.a. IMO, IALA, ITU) und sich abzeichnende Entwicklungslinien im maritimen Sektor aufzubauen. Letzteres ist insbesondere für eine kundenorientierte und – optimierte Verwertung von Raumfahrttechnologien notwendig und entspricht den übergeordneten Zielen der deutschen Raumfahrtforschung [DLR-Raumfahrt]. Diese umfassen:

- Sicherung materieller Lebensgrundlagen des Menschen durch wesentliche Beiträge zu Meteorologie, Umweltüberwachung, Katastrophenvorsorge, Ressourcenmanagement, Mobilität und Friedenssicherung sowie Anregung zum Erwerb naturwissenschaftlich-technischer Bildung,
- Ausrichtung auf Vorhaben mit wirtschaftlicher Perspektive sowie Anwendungs- und Nutzungspotenzial,
- Erwerb grundlegender Erkenntnisse über das Universum und die Erde

und werden vorrangig durch das DLR gemeinsam mit kooperierenden FuE-Einrichtungen und Unternehmen arbeitsteilig getragen. Um eine stärkere Kopplung der Raumfahrtforschung zu konkreten Anwendungen zu erreichen, wurde Ende der 90-er Jahre

ergänzend zum Themenbereich Luftfahrt die Verkehrsforschung als ein weiterer Themenbereich mit den Schwerpunkten

- Sicherung der Mobilität
- Schonung von Umwelt und Ressourcen
- Verbesserung der Sicherheit im Verkehr

in das Portfolio des DLR aufgenommen, wobei bisher eine Fokussierung auf den terrestrischen Verkehr erfolgte. Um jedoch wie angestrebt verkehrsträgerübergreifende Lösungen im gesellschaftlichen Interesse bereitstellen zu können, ist die Integration des „maritimen Verkehrs“ aus den gesellschaftlichen Anforderungen heraus als ein notwendiger Folgeschritt anzusehen. Mit ALEGRO, gefördert durch das Land Mecklenburg-Vorpommern, konnte diese Entwicklung begonnen werden.

Für die Entwicklung der Wirtschaft und der FuE-Landschaft von Mecklenburg-Vorpommern wurde die Thematik „Maritime GALILEO-Anwendungen“ als ein Aufbau Thema identifiziert. Dies wurde auch so im zwischen den Wirtschaftsministerien der Länder Mecklenburg-Vorpommern, Bayern und Niedersachsen abgeschlossenen „Memorandum of Understanding“ manifestiert und wird seit 2006 als gemeinsame Initiative regionaler FuE-Einrichtungen und Unternehmen unter dem Markennamen „Forschungshafen Rostock“ fortgeführt. Diese Initiative ist Mitglied in dem vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung eingerichteten SATNAV-Forum, in dem auf nationaler Ebene einerseits der Erfahrungsaustausch der regionalen GNSS-Initiativen in Deutschland organisiert und andererseits gemeinsam strategische Entwicklungslinien diskutiert und identifiziert werden.

Das Projekt ALEGRO sowie das im Unterauftrag des Schiffahrtinstituts Warnemünde durchgeführte Folgeprojekt ASMS, dass auf ALEGRO aufbaut, sind in diesem Kontext als erste fachliche Beiträge des DLR zu sehen, die auf die Bereitstellung einer maritimen Testfeldinfrastruktur im Hafen Rostock und auf die GBAS-Integration in anwendungsorientierte Entwicklungen wie „Vessel Traffic Management System“ (VTMS) ausgerichtet sind.

Um die Bearbeitung der FuE-Thematik „Sichere und wirtschaftlich effiziente Seefahrt“ einrichtungsübergreifend insbesondere im Land Mecklenburg-Vorpommern zu forcieren, wurde am 15. Mai 2008 der Forschungsverbund „Sichere und wirtschaftlich effiziente Seefahrt“ mit den Partnern Universität Rostock (CeMarIS), Hochschule Wismar (Fakultät für Ingenieurwissenschaften: Bereich Seefahrt), Schiffahrtsinstitut Warnemünde e.V. und DLR (Institut für Kommunikation und Navigation) gegründet und eine gemeinsame FuE-Strategie ausgearbeitet. Der Notwendigkeit folgend, den „Forschungshafen Rostock“ weiter inhaltlich und strukturell zu gestalten, um im wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Wettbewerb in Europa und im globalen Kontext bestehen zu können, wurde parallel dazu, der Aufbau eines „Netzwerkes für maritime Anwendungen“ verfolgt. Es ist vorgesehen, dass in Verantwortung des durch die Partner getragenen Netzwerkes und des zu bestellenden Netzwerkmanagers die langfristige forschungs- und entwicklungsorientierte als auch operationelle Nutzung in Projekten entstandener Infrastruktur- und Systemlösungen im Rahmen des gemeinsamen Testbetts umgesetzt wird. In beiden Maßnahmen ist das DLR auch getragen durch ALEGRO-Projektmitarbeiter aktiv vertreten.

Obwohl diese strategischen Entwicklungen nicht direkter Bestandteil des Projekts ALEGRO waren, kann aber festgestellt werden, dass mit ALEGRO eine stärkere Vernetzung des DLR, insbesondere des Standorts Neustrelitz, mit der Forschungs- und Entwicklungslandschaft in Mecklenburg-Vorpommern und eine engere Kopplung mit regional agierenden Wirtschaftsunternehmen wie u.a. EADS Rostock Systemtechnik, Thales Information Systems oder auch SAM Electronics GmbH erreicht wurde. Auch dies ist als ein Gewinn für das DLR einzustufen.

Mit dem Aufbau des maritimen Testfeldinfrastruktur im Forschungshafen Rostock getragen durch die Projekte ALEGRO, SEA GATE und ASMS und durch die den Partnern gemeinsam umgesetzten strategischen Begleitmaßnahmen (Forschungsverbund „Sichere und wirtschaftlich effiziente Seefahrt“, Netzwerk „Maritime GALILEO-Anwendungen“) werden die Chancen für eine erfolgreiche Akquisition von Forschungsfördermitteln im europäischen Rahmen (ESA, EU 7. FP, ERA-NET MARTEC) erhöht.

## **7 Auswirkungen auf die Beschäftigten**

Das Projekt ALEGRO hat wesentlich zur fachlichen Qualifizierung der beteiligten Projektmitarbeiter beigetragen. Diese ergab sich aus folgenden Notwendigkeiten:

- Durch den Aufbau eines experimentellen GBAS für maritime Anwendungen war es erforderlich, dass die Mitarbeiter sich mit dafür gültigen maritimen Standards (RTCM, NMEA, IALA DGNSS) und spezifischen Nutzeranforderungen (IMO, IALA) auseinandersetzten, um daraus abgeleitet ein geeignetes GBAS-Konzept zu erarbeiten und dafür einsetzbare Algorithmen und Verfahren zu identifizieren und zu entwickeln. Dies führte zum Aufbau von praxisrelevanten Expertisen, die für eine weiterführende Gestaltung und Entwicklung der Raumfahrt- als auch der Verkehrsforschung in Bezug auf Vorhaben mit wirtschaftlicher Perspektive sowie erhöhtem Anwendungs- und Nutzungspotenzial notwendig sind.
- Mit der Verwendung des EVnet als Entwicklungs- und Demonstrationsplattform für das experimentelle GBAS entstand die Notwendigkeit, dass nicht nur Algorithmen entwickelt sondern vielmehr als Echtzeitprozessoren umgesetzt und in das EVnet als Experimentalsystem zu implementieren waren. Das führte dazu, dass sich die Mitarbeiter mit der EVnet-Technologie auseinandersetzten mussten, dass alle Entwicklungen unter einem gleichen SW-Standard mit vorgegebenen Schnittstellen in C++ umzusetzen waren und dass zeitgleich an einem Softwaresystem mit gemeinsamer Versionsverwaltung und –kontrolle gearbeitet wurde. Diese in wissenschaftlichen Einrichtungen eher wenig praktizierte Herangehensweise hat jedoch die Mitarbeiter dazu befähigt, mit industrienahen Entwicklungsmethoden umzugehen und ein kooperatives Qualitätsmanagement im Sinne der gemeinsam kontrollierten Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems aufzubauen.
- Mit dem Projekt ALEGRO wurde erstmals ein Projekt für die Arbeitsgruppe akquiriert, in das alle Mitarbeiter der Arbeitsgruppe involviert waren. Dadurch wurde nicht nur die gruppeninterne Kommunikation ausgebaut sondern vielmehr auch der Wissensaustausch gestärkt. Davon partizipierten insbesondere die jüngeren wissenschaftlichen Mitarbeiter.

Für das Projekt ALEGRO, das durch das Land mit 70% gefördert wurde, war es notwendig, das Personal am Standort Neustrelitz mit DLR-eigenen Mitteln aufzustocken. Schon dies belegt das Interesse des DLR an diesem Themenbereich, der vorrangig durch die Mitarbeiter am Standort Neustrelitz getragen wird. Das führte zur Neueinstellung eines Doktoranden und eines Jungwissenschaftlers für den Zeitraum von 3 Jahren, also über die nominale Projektlaufzeit hinaus. Obwohl bei der Stellenauswahl die fachliche Eignung im Vordergrund stand, konnten beide Stellen mit Bewerberinnen besetzt. Dadurch konnte die Frauenquote im Themenbereich auf 40% erhöht werden. Neben der Ende 2009 geplanten Fertigstellung der Promotionsarbeit der Doktorandin ist es auch für die Jungwissenschaftlerin vorgehen, ihre in ALEGRO gesammelten Expertisen und Entwicklungen in einer Doktorarbeit zusammen zu führen.

Mit dem Projekt ALEGRO verbunden ist auch eine stärkere Wahrnehmung des DLR Standortes Neustrelitz und seiner Mitarbeiter. Diese ist für die berufliche Weiterentwicklung der beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter und des Ingenieurpersonals genauso

notwendig wie für die fortlaufende nationale und internationale Vernetzung in allen und zwischen den Wissenschaftsbereichen.

## **8 Ausblick**

Basierend auf den Arbeiten dieses Projektes und den damit gewonnenen Expertisen konnten eine Reihe von notwendigen FuE-Folgearbeiten identifiziert werden. Wichtig in diesem Kontext ist, dass das in Rostock aufgebaute GBAS Experimentalsystem durch das DLR vorab noch mindestens ein Jahr über das Projektende hinaus aus rein eigenen finanziellen Mitteln betrieben wird.

So werden z.B. die in der A-GPAF in Echtzeit abgeleiteten Qualitätskenngrößen genutzt, um eine tägliche statistische Auswertung weitestgehend automatisiert zu realisieren. Die Aufzeichnung dieser Daten und ihre fortführende Analyse werden als notwendig erachtet, um einerseits eine langzeitbasierte Charakterisierung operationeller GNSS-Systeme am Standort Rostock zu erzielen und um andererseits die Leistungsfähigkeit des GBAS selbst anhand seiner im Dauerbetrieb ermittelten Leistungskenngrößen bewerten zu können. Beide Maßnahmen werden als erforderlich angesehen, um eine Zulassung von phasenbasierten DGNSS-Verfahren als einen maritimen Standard für Differentialsysteme baldmöglichst zu erreichen.

In diesem Kontext kommt auch dem Projekt ASMS, das gegenwärtig im Unterauftrag des Schiffahrtsinstitut Warnemünde durchgeführt wird, eine besondere Rolle beim Ausbau des ALEGRO GBAS als auch bei seiner weiterführenden Nutzung zu:

- Das Projekt ASMS finanziert den HW-technischen Aufbau und den softwaretechnischen Ausbau einer GBAS-Monitoringstation im Forschungshafen Rostock, dessen primäre Aufgabe die Überwachung der ALEGRO GBAS-Referenzstation in Echtzeit ist. Dies ermöglicht die Implementierung und Erprobung eines Integritätsmonitorings wie es von der IMO und IALA für maritime DGNSS-Dienste derzeit spezifiziert ist. Die bisher implementierte Eigenüberwachung (LIM) wird dadurch aufgewertet, weil damit auch die räumliche Dekorrelation von Ausbreitungsfehlern (FFIM) im Monitoring mit berücksichtigt werden kann.
- Eine Aufgabe des DLR in diesem Projekt ist die Bewertung von kommerziell verfügbarer und bordseitig einsetzbarer GNSS-Sensorik. Für die im Forschungshafen Rostock dafür durchgeführten Messfahrten war es sehr hilfreich, dass einerseits die an der ALEGRO-Referenzstation bewerteten Daten für vergleichende Analysen nutzbar waren und das andererseits die mit RTK bestimmten Positionen (off- und on-line) als Referenzen verwendet werden konnten.
- Eine weitere Aufgabe des DLR zielt auf die Identifikation von Servicefunktionalitäten eines GNSS-basierten GBAS als eine Komponente im Rahmen der von ASMS angestrebten Entwicklung von neuen VTMS-Konzepten, die basierend auf einer Verkehrslageerfassung und ihrer Prognose eine koordinierte und optimierte Verkehrssteuerung anstreben. Für derartige, sicherheitskritische Servicefunktionalitäten ist eine lückenlose Integritätsüberwachung von einzelnen Sensoren und Komponenten über genutzte Kommunikationsverbindungen bis hin zur bordseitig implementierten Assistenz- und Steuerungselementen notwendig.

Um die Kontinuität der FuE-Aktivitäten über ALEGRO und ASMS hinaus zu sichern und um eine stärkere Kopplung der Entwicklungen an spezifische maritime Anwendungsentwicklungen zu erreichen, wurden gestützt durch die Arbeiten aus ALEGRO, bereits Folgeaktivitäten im Sinne neu gestellter Projektanträge (z.B. RoNav oder IngMAR) oder eingereichter Projektskizzen (Spitzenforschung und Innovation in den neuen Ländern)

gestartet. Der Projektantrag zu IngMAR wurde unter Federführung des DLR gestellt und eingereicht.

Das Projekt RoNav, das auf die hochpräzise, dreidimensionale Lagebestimmung zur Automatisierung der Bahnführung von Schiffen im Forschungshafen Rostock zielt, wurde im Rahmen der Exzellenzinitiative Mecklenburg-Vorpommerns im März 2008 beantragt. Ziel des Gesamtvorhabens ist die Entwicklung von Algorithmen und Verfahren zur integrierten, GNSS-gestützten Positions- und Lagebestimmung von bewegten Objekten (DLR) und zur weiterführenden Bestimmung und Prognose von Schiffsbewegungen (SIW). Es ist vorgesehen, dass das fixierte und inhaltlich abgegrenzte Thema im Rahmen sich ergänzender, jedoch interdisziplinär bearbeiteter Promotionsthemen durch Wissenschaftler am DLR und am SIW umgesetzt wird. Das Innovationspotenzial für die Lagebestimmung mittels GNSS ergibt sich aus der hybriden Nutzung von GPS und GALILEO (Verfügbarkeit von GNSS-Signalen), dem daraus resultierenden Einsatz von mehrfrequenzbasierten Verfahren zur Fehlererkennung und –unterdrückung, der Nutzung von lokal verfügbaren Ergänzungssystemen wie ALEGRO sowie durch neue Ansätze innerhalb der Algorithmen zur adaptiven Bestimmung und Nutzung stochastischer Messmodelle basierend auf einem bordseitig installierten Multiantennen- und Multiempfängersystem. Das Innovationspotenzial für die Bestimmung und Prognose der Schiffsbewegung ergibt sich aus dem erwarteten Gewinn an Präzision, Zuverlässigkeit und zeitlicher Auflösung der GNSS/GALILEO-basierten Lagebestimmung. Speziell für die Automation der Bahnführung von Schiffen im eingeschränkten Navigationsraum beim Fahren mit geringen Geschwindigkeiten ergibt sich die Innovation durch die Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Schiffen ohne starre Reglerstrukturen.

Das FuE-Vorhaben IngMAR zielt in seiner ersten Phase auf die Entwicklung eines integrierten Ground Based Augmentation Systems für maritime Anwendungen im Hafen Rostock. Integriertes GBAS im Rahmen des Verbundprojektes bedeutet

- die technische Weiterentwicklung und Zusammenführung von GNSS-basierten (ALEGRO, SEA GATE) Ergänzungssystemen unter dem Aspekt der Integritätsüberwachung und der technologieübergreifenden Servicebereitstellung
- die Entwicklung und Erprobung von bord- und landseitigen Komponenten zur Unterstützung der Schiffsführung und zur optimierten Gestaltung zugeordneter Verkehrsprozesse im Hafenumfeld unter Verwendung bereitgestellter GNSS-Dienste für eine präzise und verlässliche Ortung
- die prototypische Integration der technologischen Produkt- und Verfahrensentwicklungen in bordseitige Navigationssysteme und in das Hafenmanagementsystem von Rostock
- die Bereitstellung eines technologieübergreifenden Servicecenters für den Hafen Rostock

Diese Teilthemen sind insbesondere darauf ausgerichtet, den mit dem zukünftigen Satellitennavigationssystem GALILEO verbundenen technologischen Mehrwert in innovative Produkte und Dienste umzusetzen, die letztlich für eine sichere und wirtschaftlich effiziente Gestaltung von maritimen Verkehrs- und Transportprozessen im Hafenumfeld beitragen. Eine dafür notwendige Grundlage ist die arbeitsteilige und interdisziplinäre Gestaltung der dafür notwendigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den Bereichen originäre Satellitennavigation, Schiffsnavigation, Schiffskommunikation, Schiffssteuerung sowie Verkehrs- und Transportprozessmanagement. Besonderes Augenmerk ist dabei einerseits auf die Entwicklung und Gestaltung von end-to-end Systemlösungen und andererseits auf die Spezifikation und Bereitstellung notwendiger Schnittstellen für eine anwendungsübergreifende Nutzung in Bezug auf zu etablierende Dienste zu richten.

Basierend auf den bis zu ihrer experimentellen Demonstration vorangetriebenen technologischen Entwicklungen in allen Teilthemen sollen am Ende dieses

Verbundvorhabens (Phase 1) durch die Projektpartner gemeinsam Komponenten, Subsysteme und Services identifiziert werden, deren Chancen für die Überführung in marktfähige Produkte und Dienste nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg verspricht. Um diese Herausforderung mittel- und langfristig erfüllen zu können, besteht das Projektkonsortium neben tragenden FuE-Einrichtungen im Land Mecklenburg-Vorpommern (Schiffahrtsinstitut Warnemünde, Hochschule Wismar, Universität Rostock) aus Unternehmen wie EADS RST, T-Systems, Germanischer Lloyd und der Hafenentwicklungsgesellschaft Rostock.

Die dem DLR zugeordneten FuE-Aktivitäten im Rahmen von IngMAR sind der Ausbau und die Weiterentwicklung des GBAS-Bodensegments als auch die Entwicklung geeigneter GNSS/GBAS-basierter Bordsysteme als Nutzerterminals. Die Weiterentwicklung des Bodensegments beruht aus dem Übergang vom Einempfänger- zum Mehrempfängerkonzept durch Integration der ASMS-Station sowie durch die Integration der SEA GATE Pseudolitesignale in die Signalüberwachung der GNSS Performance Assessment Facility. Die Wirksamkeit GNSS/GBAS-basierter Ortung und Navigation wird letztlich auf der Nutzerseite bewertet. Die in diesem Themenbereich mit einem hohen Aufwand an Forschung verbundenen Arbeiten zielen auf die Entwicklung und den Einsatz innovativer Verfahren, die sich insbesondere aus dem technologischen Mehrwert von GALILEO ergeben. Zielstellung ist es, neben der Entwicklung und Implementierung neuer Algorithmen auch Vergleichsverfahren durchzuführen, die vorab Rückschlüsse auf die Genauigkeit und Robustheit dieser Verfahren im Anwendungskontext erlauben und letztlich dann für den aufzubauenden Demonstrator der GNSS/GBAS-basierten Nutzerplattform verwendet werden.

Um das Forschungspotenzial im Land Mecklenburg-Vorpommern im Themenbereich „Sichere und wirtschaftlich-effiziente Seefahrt“ zu konzentrieren und zu stärken, wurde unter Federführung der Universität Rostock (Department Maritime Systems) gemeinsam mit der Hochschule Wismar (Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Bereich Seefahrt, ISSIMS), dem Schiffahrtsinstitut Warnemünde e.V., dem Institut für Kommunikation und Navigation des DLR sowie dem Helmholtz-Zentrum Potsdam (GeoForschungsZentrum (GFZ)) eine Projektskizze für das BMBF-Programm „Spitzenforschung und Innovation in den Neuen Ländern“ unter dem gleichen Namen eingereicht.

Die damit verbundene Gesamtstrategie der FuE-Aktivitäten des IKN bestehend aus den Projekten ALEGRO, ASMS, RoNav und IngMAR sowie der Projektskizze „Spitzenforschung und Innovation in den Neuen Ländern“ ist zusammenfassend in Abb. 8-1 dargestellt. Während in den ersten 4 Projekten der Bereich Satellitennavigation und seine maritime Nutzung im Mittelpunkt steht, fokussieren sich die FuE-Aktivitäten im BMBF-Programm verstärkt auf eine integrative Nutzung erweiterter raumfahrtgestützter Technologien im maritimen Sektor.

An dieser Stelle sei bemerkt, dass die Entscheidungen über eine Förderung von RoNav, IngMAR und der Spitzenforschung NBL derzeit offen sind und dass nicht jeder der auf ALEGRO aufbauende Versuch zur Akquisition von Folgeprojekten erfolgreich war. Zu den nicht erfolgreich akquirierten Projekten gehörte das mit Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Länder Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen verfolgte Projekt InnoMAG als auch der der Aufbau eines Konsortiums mit polnischen Partnern für den 1. MARTEC-Call (ERA-NET). Obwohl in beiden Fällen eine inhaltliche Spezifikation und Strukturierung der Arbeitsinhalte gemeinsam erreicht wurde und die Industrie auch die verfolgten FuE-Aufgaben als notwendig für die Sicherung der Vorlaufforschung anerkannte, scheiterten diese Vorhaben daran, dass die in diesem Sektor agierenden Unternehmen nicht bereit oder in der Lage waren, die Projektleitung zu übernehmen. Gründe dafür sind entweder die fehlende Kapitaldecke oder das als erhöht eingestufte Risiko einer wirtschaftlichen Verwertung (Revenue/Turnover). Letzteres ergibt sich insbesondere aus den offenen Standardisierungs- und Zulassungsprozessen



insbesondere bei innovativen Technologieentwicklungen in sicherheitskritischen Verkehrsbereichen.

	<b>GBAS</b>	<b>Integriertes Navigationssystem (INS)</b>	<b>Vessel Traffic Management Systeme</b>
<b>ALEGRO (2006-2008)</b>	GBAS-Experimentalsystem (1. Station), A-GPAF, RTK-Verfahren	—	—
<b>ASMS (2007-2009)</b>	Ausbau GBAS-Experimental-System (2. Station), RTK-Monitoring im GBAS	Validierung kommerzielle Bordsensorik mit ALEGRO's RTK	GBAS für VTMS: Anforderungen und Konzepterstellung
<b>RoNav* (2009-2010)</b>	—	Hochpräzise und integre Lagebestimmung von Schiffen für Bahnbestimmung & -prognose	—
<b>IngMAR Phase 1* (2009-2011)</b>	Ausbau GBAS-Experimental-System: Fehlerdekorrelation, Integrität, PSL-Monitoring, GALILEO-Integration, QC	Intelligente INS: FuE in Nav-Algorithmik (Galileo), Integriertes INS als Test- & Demonstrationsplattform	Spezifikation GBAS-VTMS-Schnittstellen und partielle Umsetzung
<b>Spitzenforschung NBL* (2010-2015)</b>	Flächendeckendes GBAS, Validierung & Zulassung (IALA/AIS-dGNSS), GBAS-Dienste (KOM, VTMS)	Adaptive INS mit/ohne GBAS, Sensorfusion und -substitution, Brücke 2020, INS für Schiffsassistenzsysteme	KOM für VTMS, Seewettermonitoring, GBAS-Funktionalitäten für VTMS-Assistenzsysteme

**Abb. 8-1** Realisierte, in Bearbeitung befindliche und geplante (blau) FuE-Beiträge des DLR abgebildet auf Projekte und Vorhaben des Forschungshafens Rostock

Um dieses regionale und nationale Marktversagen mittelfristig zu beheben, wird durch das geplante Projekt IngMAR auch versucht, das Risikopotenzial für eine wirtschaftliche Verwertung von Produkten und Diensten in diesem Sektor zu senken, in dem dafür notwendige Validierungs-, Standardisierungs- und Zulassungsprozesse ein integrale Entwicklungsaufgabe sind.

## 9 Veröffentlichungen und Schutzrechte

Im Rahmen des Projekts ALEGRO wurden die in Tab. 9-1 aufgelisteten Veröffentlichungen in Form von Konferenz- und Workshopbeiträgen als auch Messeauftritten und Demonstrationen umgesetzt.

**Tab. 9-1 Veröffentlichungen**

ID	Tagung / Zeitschrift	Titel	Autor	Typ
2006-1	3rd ESA workshop on Satellite Navigation User Equipment Technology, Noordwijk, 11.-13. Dezember 2006	Carrier autonomous Cycle Slip Detection and Correction based on High-rate Processing.	E. Engler, A. Hirle, S. Schlüter, T. Noack, D. Klähn	V, TB
2007-1	DGON Schifffahrtstage 1/2007, Rostock-Warnemünde, 21./22. März 2007	Projekt ALEGRO – RTK basierte Positionierung im Hafen Rostock – erste Messergebnisse	E. Engler, A. Hirle, S. Schlüter, T. Noack, R. Reimer, D. Klähn, C. Becker, U. Netzband	V
2007-2	CeBIT Vortragsreihe „CeBIT in Motion“, Reihe Telematics & Navigation und Messestand	Forschungshafen Rostock	E. Engler	V
2007-3	CeBIT Messestand „IT-Initiative MV“	Forschungshafen Rostock	u.a. E. Engler	M
2007-4	1. ESA Technologie Workshop für MV, Neubrandenburg, 2007-09-09	Das Projekt ALEGRO im Rahmen der Initiative „Forschungshafen Rostock“ des Landes MV	E. Engler	V
2007-5	Galileo in FP 7, International Information Day, Darmstadt, 2007-11-20	Research Port Rostock	S. Schlüter, E. Engler	V
2007-6	Kolloquiumsvortrag am Institut für Ostseeforschung, 30. Okt. 2007	ALEGRO – Entwicklung eines maritimen GNSS-Ergänzungssystems für hochpräzise, zuverlässige GALILEO-Anwendungen im Forschungshafen Rostock	S. Schlüter, E. Engler, J. Bouiacha	V
2008-1	CNES [Hrsg.]: 2008 Toulouse European Navigation Conference, Toulouse Space Show'08, Toulouse, Frankreich, 2008-04-22 – 2008-04-25	ALEGRO: a step towards a maritime GALILEO GBAS	J. Beckheinrich, E. Engler T. Noack, S. Schlüter, A. Hirle, D. Klähn	V, TB
2008-2	GeoForum MV, GeoForum MV, Rostock-Warnemünde, 2008-04-28	GNSS-basierte Ortungs- und Navigationsverfahren für maritime „Safety of Life“ Anwendungen	E. Engler, J. Beckheinrich, A. Hirle D. Klähn, T. Noack, R. Reimer S. Schlüter	V, TB
2008-3	CeBIT Vortragsreihe Telematics & Navigation, 2008, Hannover, 2008-03-05	Technologien für maritime "Safety of Life" Anwendungen	W. Mett, E. Engler, M. Lehde	V
2008-4	Verein Deutscher Ingenieure (VDI) [Hrsg.]: Technik in Bayern, Technik in Bayern, Schwerpunkt Schifffahrt, 4/2008, S. 38 - 38, ISSN 1610-6536 und 1610-6555	Moderne Schiffsführung durch Globale Satellitennavigationssysteme.	E. Engler, R. Müller	Z

2008-5	Gastvorlesung TU Dresden an der Fakultät für Verkehrswissenschaften, Dresden, 23. Mai 2008	Forschung und Entwicklung für GNSS-basierte „SoL“-Anwendungen.	E. Engler	G
2008-6	Workshop des ITG-Fachausschusses 7.2 Funksysteme, DLR, Wessling, 2008-06-05	Ground Based Augmentation - erste Schritte im maritimen Umfeld.	E. Engler	V
2008-7	Internationale Konferenz ISIS 2008, ISIS 2008 International Symposium Information on Ships, ISIS 2008, Hamburg, 2008-09-18 - 2008-09-19	GBAS-Technologies for High Precise Safety-Critical Maritime Navigation.	S. Schlüter E. Engler, T. Noack, J. Beckheinrich, A. Hirle, C. Becker, D. Klähn	V
2008-8	Internationale Konferenz POSITIONS 2008, Dresden, 07.-09. Okt. 2008, Tagungsband ISBN 978-3-937655-18-5	GNSS-based solutions for maritime „Safety of Life“ application with increased accuracy requirements	E. Engler, T. Noack, J. Beckheinrich, A. Hirle, S. Schlüter, R. Reimer, D. Klähn	V, TB
2008-9	Internationale Konferenz POSITIONS 2008, Demonstration des ALEGRO GBAS auf dem Messestand des SatNav Forums.	ALEGRO	T. Noack	M, D
2008-10	Workshop „Forschungshafen Rostock“ als wissenschaftliches Begleitprogramm der Messe „BALTIC Future“, 2008-11-18	Satellitenbasierte Ortung zur maritimen Navigation	C. Günther	V
2008-11	Workshop „Forschungshafen Rostock“ als wissenschaftliches Begleitprogramm der Messe „BALTIC Future“, 2008-11-18	Lokale Ergänzungssysteme für eine präzise und verlässliche Ortung in Hafengebieten.	E. Engler, T. Noack	V, D
2008-12	DLR Messestand auf der Messe „BALTIC Future“, 2008-11-18 bis 2008-11-20	Demonstration des ALEGRO GBAS	T. Noack, C. Becker A. Hirle	M, D
2008-13	4rd ESA workshop on Satellite Navigation User Equipment Technology, Noordwijk, 10.-12. Dezember 2008	Status and impact of stochastic models in GNSS Evaluation	J. Beckheinrich	V, TB
2008-14	4rd ESA workshop on Satellite Navigation User Equipment Technology, Noordwijk, 10.-12. Dezember 2008	Utilisation of the Empirical Mode Decomposition for error detection and correction within GNSS high precision applications	A. Hirle	V, TB

V: Vortrag/Präsentation

M: Messestand

TB: Tagungsband

Z: Zeitschrift

G: Gastvorlesung

D: Demonstration

Patentanmeldungen erfolgten im Rahmen dieses Projektes nicht. Wesentlicher Grund dafür war vor allem der hohe Anteil an SW- und HW-technischen Systementwicklungsarbeiten, die für den Aufbau des experimentellen GBAS-Systems im Forschungshafen Rostock erforderlich waren. Jedoch zeichnen sich bereits heute neue Verfahrensmethoden (siehe 2008-13 und 2008-14 aus der Tabelle Veröffentlichungen) ab, für die bei ihrer Weiterentwicklung auch Schutzrechtsansprüche gestellt werden könnten.

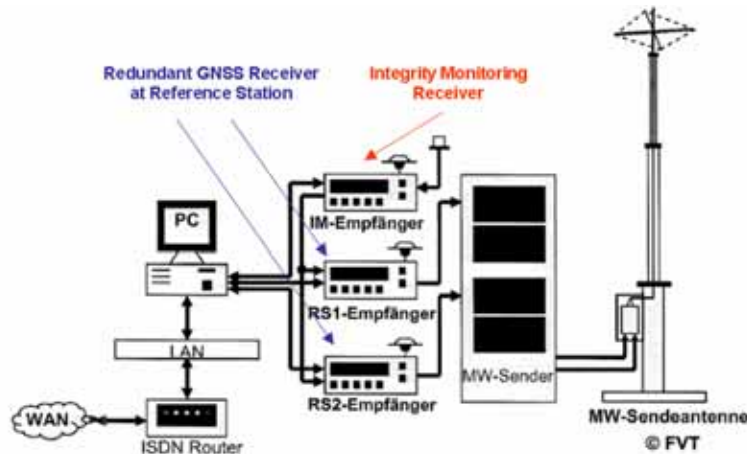
## 10 Referenzen

- [Brunkhorst-2006] Brunkhorst, M.: „SAPOS® - HEPS-Anwendungen in der Hamburg Port Authority (HPA)“, Präsentation auf dem SAPOS® - Anwendertreffen 2006, Hannover 15.Nov.2006
- [IMO A.915(22)] IMO: Revised maritime Policy and Requirements for a future Global Navigation satellite System (GNSS), 22.01.2001, A22/Res.915, (<http://www.imo.org>, Download 01.10.2008)
- [Klepsvik-2004] Klepsvik, John O.: Galileo Local Services and the RTCM SC104 DGNSS standards, Kongsberg Seatex A/S, Dokument-Nr.: RTCM Paper 97-2004/SC104-342 (<http://members.cox.net/sc104/097-2004-SC104-342.doc>, Download 23.09.2008)
- [IMO MSC.114(73)] IMO: Adoption of the Revised Performance Standards for Shipborne DGPS and DGLONASS maritime Radio Beacon Receiver Equipment. 01. Dez. 2000, MSC 73/21/add.3, (<http://www.imo.org>, Download 01.10.2008)
- [IEC-61108-4] Navigations- und Funkkommunikationsgeräte und –systeme für die Seeschifffahrt - Weltweite Navigations-Satellitensysteme (GNSS) – Teil4: DGPS – und DGLONASS-Seefunkbaken – Empfangsanlagen – Leistungsanforderungen, Prüfverfahren und geforderte Prüfergebnisse, Stand: Juni 2005
- [IALA-R-121] IALA: Recommendation R-121 on the Performance and Monitoring of DGNSS services in the Frequency Band 283.5 – 325 kHz; Edition 1.1, Dez. 2004 (<http://www.tidelandsignal.com/web/information/IALA/Recommendations/R-121-DGNSS-2004.pdf>, Download 15.10.2008)
- [Noack-2004] Noack, Thoralf; Klähn, Dietmar; Steinbach, Ingolf; Hartmann, Rolf (2004): Experimentation and Verification Network - A new platform for the distribution of GNSS data via Internet. In: DGLR Jahrbuch 2004, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Dresden, 20.-23.Sept. 20
- [Noack-2005] Noack, Thoralf; Engler, Evelin; Klähn, Dietmar (2005): High Rate Performance Assessment of GNSS Raw Data Based on the DLR Experimentation and Verification Network. ION GNSS 2005, Long Beach, CA (USA), 2005-09-13 - 2005-09-16
- [Noack-2006] Noack, Thoralf; Engler, Evelin; Klähn, Dietmar; Schlüter, Stefan (2006): Experimentation and Verification Network based GNSS Verification. In: 26th European Telemetry Conference, ETC 2006, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 02.05.- 05.05.2006
- [Engler-2006] Engler, Evelin; Hirrlé, Angelika; Schlüter, Stefan; Noack, Thoralf; Klähn, Dietmar (2006): Carrier autonomous Cycle Slip Detection and Correction based on High-rate Processing. In: ESA [Hrsg.]: 3rd ESA workshop on Satellite Navigation User Equipment Technology, Noordwijk, 11.-13. Dezember 2006
- [Hirrlé-2006] Hirrlé, Angelika; Engler, Evelin (2006): SPEKTRALANALYSE VON HOCHRATIGEN GPS-PHASENMESSUNGEN UND ABGELEITETEN FEHLERANTEILEN. In: DGLR [Hrsg.]: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2006, Braunschweig, 6.-9. November 2006
- [Engler-2004] Engler, E.; Schlüter, S. (2004): Characteristics of high rate GNSS navigation data and their utilisation for different monitoring purposes. In: ESA [Hrsg.]: Proceedings NAVITEC '2004, 2nd ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies NAVITEC '2004, 8-10 December 2004, Noordwijk, The Netherlands, Noordwijk, Holland
- [Coast Guard-2008] Navigation Center of the U.S. Department on Homeland Security. United States Coast Guard: DGPS Site Coverage Plots. (<http://www.navcen.uscg.gov/dgps/coverage/default.htm>, Download 23.10.2008)
- [Christansen-2005] Christiansen, S.E.; Klepsvik, J.; Fairbanks, M.; Grant, A., Ward, N., Jandrisits, M.: GALILEO in Maritime Application. ION GNSS 18th International Technical meeting, 13.-16.Sept.2005, Long Beach, CA, USA.
- [IALA-R-135] IALA: Recommendation R-135 on the Future of DGNSS. Edition 1, Dez. 2006 (<http://site.ialathree.org/pages/publications/>, Download 23.10.2008)

- [DLR-Raumfahrt] DLE-WWW: Weltraumforschung im DLR.  
([http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-11/96\\_read-177/](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-11/96_read-177/), Download 27.10.2008)
- [Hoppe-2006] Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken (Dipl.-Ing. M. Hoppe): Technische Daten, Systemparameter und Aufbau der DSGPS Referenzstationen nach IALA Standard. 28.12.2006, ([http://www.wsv.de/fvt/dgps/informationen/technische\\_daten.pdf](http://www.wsv.de/fvt/dgps/informationen/technische_daten.pdf), Download 19.11.2008)
- [McKessock-2007] G. McKessock: A Comparison of Local and Wide Area GNSS Differential Corrections disseminated using Network Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). UNB Technical Report No. 249, April 2007
- [Teunissen-1993] Teunissen, P.J.G. „Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities“ In: Section IV Theory and Methodologym IAG General Meeting, August 1993,
- [Teunissen-1994] Teunissen, P.J.G. „A new method for carrier phase ambiguity estimation“, In: Proc. IEEE Plans '94, April 11-12 1994, Las Vegas, pp. 862-873 (1994)
- [Teunissen-1995] Teunissen, P.J.G., P.J. de Jonge and C.C.J.M. Tiberius, „A new way to fix carrier phase ambiguities“, GPS World, 4, pp. 58-61 (1995)
- [Wellenhof-2003] Hofmann-Wellenhof, B., Legat, K., and Wieser, M. (2003): Navigation - Principles of Positioning and Guidance. Springer, Wien, New York
- [Rothacher-2007] Rothacher, M. (2007): Satellitengeodäsie I. (Einführung in GPS), Vorlesungsskriptum Sommersemester 2007. Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München. Kapitel 12 Seite 158.
- [STANAG 4294] Technical Characterisation of the NAVSTAR GPS, Jun. 1991 (for public release)
- [Hatch-82] The synergism of GPS code and carrier measurements. Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning. New Mexico, II, Seite 1213ff.
- [Walther-95] Walter, T., Enge, P.: Wighted RAIM für Presision Approach.  
[http://waas.stanford.edu/~www/papers/gps/PDF/wraim\\_tfw95.pdf](http://waas.stanford.edu/~www/papers/gps/PDF/wraim_tfw95.pdf) (Download, 01.02.2008)
- [RTCM3-2008] RTCM Paper 141-2005-SC104-398, Ver 3 Galileo Proposed Messages – Draft 3, 11/08/2005
- [GPS-ICD] GPS Interface Control Document,  
<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/icd200cw1234.pdf> (Download, 30.03.2008)

## Anlage A: IALA Beacon DGNSS und sein Integritätskonzept

Der prinzipielle Aufbau einer IALA Beacon DGNSS Station ist u.a. in [Hoppe-2006] beschrieben und entspricht folgender Darstellung:



Eine redundante Auslegung der Referenzstationsempfänger (hier 2) stellt dabei eine Grundsicherung gegenüber Empfängerausfällen dar. Mindestens ein Integritätsmonitoringempfänger am Referenzstandort oder weiter entfernt ist für die Überwachung der Leistungsfähigkeit DGNSS-basierter Positionsbestimmung je nach angewandtem Integritätskonzept erforderlich.

Durch Einsatz solcher Stationen, die Korrekturinformationen im Mittelwellenbereich ausstrahlen, wird eine Steigerung der GNSS-basierten Positionierungsgenauigkeit (GPS-Einfrequenznutzung) im Küstenbereich abgesichert. Das unterstützte Differentialverfahren beruht auf der Bereitstellung von Range- und Rangeratenkorrekturen, die am bekannten Standort der Referenzstation bestimmt werden. Der gemessene Range  $\rho_{REF}^{isat}$  (Distanz zwischen dem Satelliten mit der Identifikationsnummer  $isat$  und einem Messstandort  $[X_{REF}, Y_{REF}, Z_{REF}]$ ) ergibt sich allg. als

$$\rho_{REF}^{isat} = \sqrt{(X^{isat} - X_{REF})^2 + (Y^{isat} - Y_{REF})^2 + (Z^{isat} - Z_{REF})^2}$$

und ist effektiv die Summe aus dem geometrischen Range und überlagerten Fehler

$$\rho_{REF}^{isat} = R_{geo, REF}^{isat} + c \cdot (dT^{isat} - dt_{REF}) + ION_{REF}^{isat} + TRO_{REF}^{isat} + e_{REF}^{isat},$$

mit

- $dT^{isat}$  - der Satellitenuhrenfehler
- $dt_{REF}$  - der Empfängeruhrenfehler
- $ION_{REF}^{isat}$  - der ionosphärisch bedingte Laufzeitfehler
- $TRO_{REF}^{isat}$  - der troposphärisch bedingte Laufzeitfehler
- $e_{REF}^{isat}$  - zufällige (Empfängerrauschen) und umgebungsbedingte (Mehrwegeausbreitung) Fehler.

Der so genannte „wahre“ Range wird dabei als

$$\hat{R}_{\text{REF}}^{\text{isat}} = \sqrt{(X^{\text{isat}} - X_{\text{REF}})^2 + (Y^{\text{isat}} - Y_{\text{REF}})^2 + (Z^{\text{isat}} - Z_{\text{REF}})^2}$$

aus der mehr oder minder genauen, aus den Navigationsdaten abgeleiteten Satellitenposition und dem bekannten Antennenstandort der Referenzstation berechnet und wird für die Bereitstellung des satellitenspezifischen Rangekorrekturwertes  $\text{PRC}_{\text{REF}}^{\text{isat}}$  genutzt:

$$\text{PRC}_{\text{REF}}^{\text{isat}} = \hat{R}_{\text{REF}}^{\text{isat}} - \rho_{\text{REF}}^{\text{isat}}.$$

Nutzerseitig wird dieser Wert zur Korrektur des gemessenen Ranges genutzt:

$$\tilde{\rho}_{\text{usr}}^{\text{isat}} = \rho_{\text{usr}}^{\text{isat}} + \text{PRC}_{\text{REF}}^{\text{isat}}.$$

Die damit erreichbare Positionsgenauigkeit wird im Bereich von 1 bis 10 m angegeben [McKessock-2007] und hängt letztlich vom Abstand des Nutzers von der Referenzstation und der damit verbundenen räumlichen Dekorrelation der in den Korrekturwerten enthaltenen Fehleranteile ab. Untersuchungen an portugiesischen Küstenstationen belegten, dass Rangekorrekturen zumindest unter Normalbedingungen als langsam veränderlich eingestuft werden können. Der zeitliche Dekorrelationsfehler wurde dabei mit 2mm/s bestimmt. Die daraus resultierende Idee, aus einer Sequenz von Rangekorrekturen die „mittlere“ Rangeratenkorrektur (RRC) zu bestimmen, wurde bereits im RTCM 2.x als weiterer Korrekturwert berücksichtigt. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der Zeitdifferenz  $dt$  zwischen Korrekturwertbereitstellung und –anwendung bei der nutzerseitigen Berechnung des korrigierten Ranges

$$\tilde{\rho}_{\text{usr}}^{\text{isat}} = \rho_{\text{usr}}^{\text{isat}} + \text{PRC}_{\text{REF}}^{\text{isat}} + \text{RRC}_{\text{REF}}^{\text{isat}} \cdot dt.$$

Eine erste Integritätsüberwachungsfunktionalität im IALA Beacon DGNSS ist die Bewertung bereitgestellter Korrekturwerte (PRC und RRC) anhand vorgegebener, plausibler Wertebereiche. Liegt der PRC außerhalb des Wertebereiches (90 – 600 m)<sup>9</sup> bzw. der RRC außerhalb des Wertebereiches (0.5 – 10 m/s), so wird ein Referenzstationsalarm ausgelöst, der effektiv den spezifischen Satelliten als „do not use“ klassifiziert. Zugeordnet erfolgt ein Umschalten auf den „stand by“-Referenzstationsempfänger, falls ein solcher verfügbar ist.

Die Referenzstation selbst wird in den „stand by“ Betriebsmodus gesetzt, wenn weniger als 4 GNSS-Signale durch sie empfangen werden.

Weiterführende Integritätsüberwachungsfunktionen sind an die Verfügbarkeit von Integritätsmonitoringstationen und der durch sie umgesetzten, routinemäßigen Bereitstellung von Statusinformationen gebunden. Fällt das Integritätsmonitoringfeedback länger als eine erlaubte Zeitdifferenz (3 – 12s) aus, so wird das IALA Beacon DGNSS als „unmonitored“ klassifiziert.

Die eigentliche Bewertung der Leistungsfähigkeit DGNSS-basierter Positionsbestimmung erfolgt durch die Integritätsmonitoringstation und dem Ergebnis zugeordneter Überwachungsfunktionalitäten. Überschreitet das Alter verfügbarer RTCM-Korrekturen einen bestimmten Schwellwert (10 – 30 s), ist die Signalstärke und der SNR geringer als die geforderten Nominalwerte oder wird eine erhöhte Fehlerrate in den Korrekturdaten festgestellt, so wird ein Integritätsmonitoringalarm ausgelöst, der auch effektiv ein Umschalten auf den „stand by“-Referenzstationsempfänger initiiert, falls ein solcher verfügbar ist. Ein Integritätsmonitoringalarm wird auch ausgelöst, wenn u.a. die Anzahl

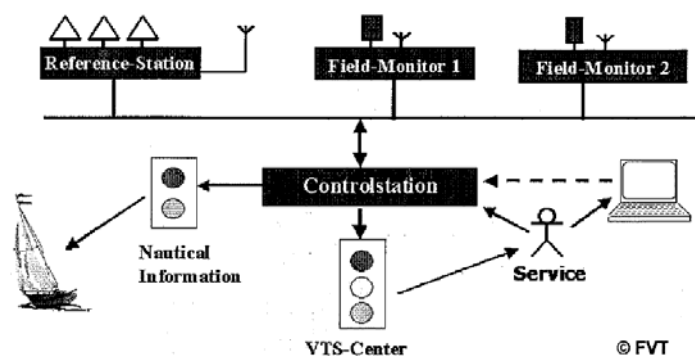
<sup>9</sup> Die im Folgenden jeweils in Klammern angegebenen Werte sind als stationsspezifische Settings zu verstehen und können folglich von Station zu Station variieren.

getrackter Satelliten an der Integritätsmonitoringstation unter einem vordefinierten Schwellwert (3 oder 4) fällt oder der HDOP-Wert den vorgegebenen HDOP-Schwellwert (7.5) länger überschreitet. In solchen Fällen wird die Referenzstation als „unmonitored“ klassifiziert. Basierend auf den GNSS-Eigenmessungen am Standort der Integritätsmonitoringstation wird eine nutzervergleichbare Positionsbestimmung unter Verwendung der von der Referenzstation empfangenen Korrekturdaten durchgeführt. Überschreiten die in diesem Kontext bestimmten Restfehler

- Absolute horizontal Positionsfehler ( $> 1.5 - 10$  m)
- Pseudorangeresiduum (12 m)
- Rangeratenresiduum (10 m/s)
- UDRE (1 – 100 m)

ihre Schwellwerte, so wird entweder die Referenzstation als „unmonitored“ klassifiziert oder im Fall von satellitenspezifischen Größen der betroffene Satellit als „do not use“ charakterisiert.

Je nach Distanz der Integritätsmonitoringstation zur Referenzstation wird zwischen dem „Local Integrity Monitoring“ (LIM) und dem „Far Field Integrity Monitoring“ (FFIM) unterschieden. Das FFIM ist dem LIM vorzuziehen, weil es ermöglicht, die Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung des aktuellen, räumlichen Dekorrelationsverhaltens spezifischer Fehleranteile zu bewerten. Dies spiegelt sich auch in der Darstellung des deutschen DGPS Referenz- Monitor- und Kontrollnetzwerkes wieder (Quelle: [Hoppe-2006]).



Die mit IALA Beacon DGNSS zu gewährleistenden Nutzeranforderungen sind abschließend in folgender Tabelle aufgelistet:

	IMO Ocean/Coastal	Inland
Positioning Accuracy ( $2\sigma$ ):	$< 10$ m	$< 5$ m
	Europe	USA / Russia
Coverage DGNSS	200 - 300 km	300 - 500 km
	Coastal/Harbour/Inland (low level of risk)	Coastal/Harbour/Inland (high level of risk)
Availability	$> 99.5\%$ over 2 years	$> 99.8\%$ over 2 years
Continuity	$> 99.85\%$ over 3 hours	$> 99.97\%$ over 3 hours
Integrity	Time to Alarm less than 10 s	